文章编号:1000-4939(2024)06-1211-26

专家介绍



许增光,西安理工大学教授,博士生导师。国家优秀青年科学基金获得者,陕西省科技创新团队负责人,陕西省青年科技奖获得者,陕西好青年获得者,陕西省水力发电与新能源工程学会副秘书长,中国大坝工程学会库坝渗流与控制专业委员会委员,中国水力发电工程学会大坝安全专业委员会委员等。长期从事水利工程库坝系统渗流分析与控制方面的研究工作,先后主持国家自然科学基金 4 项,国家 863 计划子课题 1 项,中国博士后科学基金 1 项,陕西省自然科学基金 3 项,其他纵向科研项目及企业委托课题 40 余项,研究成果已在鲁地拉水电站、乌弄龙水电站、陕西省引汉济渭工程以及清原、潍坊、尚义、雄安抽水蓄能电站等水利水电工程中应用,为工程的防渗设计提供了有效支撑。已发表学术论文 130 余篇,参编标准 1 部,出版学术专著 3 部,荣获陕西省科学技术一等奖 2 项(排名第一、第四)、陕西省科学技术二等奖 1 项(排名第一)等科研奖励。

岩土体介质非达西渗流特性研究进展

许增光,李煜婷,曹成

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘　要:岩土体是常见的天然材料和工程材料,厘清不同环境下的岩土体非达西渗流特性,是评价工程防渗性能和渗透稳定性的基础。岩土体兼具孔隙和裂隙结构,渗流流态可划分为低速非达西渗流、达西渗流和高速非达西渗流,达西定律等线性渗流模型将低估低速非达西渗流流速、高估高速非达西渗流流速。目前,岩土体非达西渗流分析研究手段包括试验法、数值模拟法和数学解析法,主要分析非达西渗流流态及其影响因素,并构建非达西渗流模型。其中空隙几何结构、剪切作用、渗流水压力等因素对岩土体非达西渗流特性影响显著。岩土体内部蜿蜒曲折的空隙结构导致渗流能量损失增大,剪切作用则使岩土体空隙结构处于较为复杂的变化状态,渗流水压力则直接增大水流惯性力,影响渗流流态,上述研究手段和因素分析是目前学者们针对岩土体非达西渗流特性的研究重点。由于试验条件、理论基础和计算机性能的局限性,渗透破坏阶段颗粒群迁移过程、岩土体多场耦合渗流分析、全域可视化渗流试验、大尺度多重介质渗流场计算等方面是未来岩土体非达西渗流分析值得关注的重点。

关键词:岩土体;非达西渗流;影响因素;非达西渗流模型

中图分类号:TV139.1　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.001

收稿日期:2024-04-19　　**修回日期**:2024-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.52179143;52209167);陕西省创新能力支撑计划项目(No.2022TD-01)

通信作者:许增光,教授。E-mail:xuzengguang@xaut.edu.cn

引用格式:许增光,李煜婷,曹成.岩土体介质非达西渗流特性研究进展[J].应用力学学报,2024,41(6):1211-1236.
XU Zengguang,LI Yuting,CAO Cheng.Research progress on non-Darcy seepage characteristics of soil and rock masses[J].Chinese journal of applied mechanics,2024,41(6):1211-1236.

Research progress on non-Darcy seepage characteristics of soil and rock masses

XU Zengguang, LI Yuting, CAO Cheng

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,
Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: Soil and rock mass are common natural and engineering materials. Clarifying the non-Darcy seepage characteristics of soil and rock mass under different environments is the basis for evaluating the anti-seepage performance and permeability stability of engineering projects. Both soil and rock mass have pore and crack structures; the seepage flow pattern can be classified as low-speed non-Darcy seepage, Darcy seepage and high-speed non-Darcy seepage. Linear models such as Darcy's law will underestimate the flow velocity of low-speed non-Darcy seepage, but will overestimate that of high-speed non-Darcy seepage. Currently, research methods for analyzing non-Darcy seepage in soil and rock mass include experimental methods, numerical simulation methods, and mathematical analytical methods. These mainly analyze the non-Darcy flow state and its influencing factors to construct a non-Darcy flow model. Factors such as void geometry structure, shear effect, and hydraulic pressure significantly affect the non-Darcy seepage characteristics of soil and rock mass. The winding void structure inside soil or rock leads to increased energy loss during infiltration; shear effect causes complex changes in the void structure; hydraulic pressure directly increases water inertia force, affecting the flow state during infiltration. The above research methods along with factor analysis are currently key areas that scholars focus on when studying the non-Darcy seepage characteristics of soil or rock masses. Due to limitations of experimental conditions, theoretical basis and computer performance, the migration process of particle groups in the seepage failure stage, the multi-field coupling seepage analysis of rock and soil mass, the global visual seepage test, and the large-scale multi-media seepage field calculation will be the key aspects of non-Darcy seepage analysis of rock and soil mass in the future.

Key words: soil and rock mass; non-Darcy seepage; influencing factor; non-Darcy seepage model

岩土体是水利工程、岩土工程、交通工程的建设基础和重要材料。在蓄水、地下水、降雨等因素影响下,岩土体渗流特性复杂且难以预测,严重者将危害工程安全。以水利工程为例,50%以上的工程失事均由渗漏、渗透破坏、渗蚀等渗流问题引起。因此厘清岩土体渗流机理并构建适应复杂环境的渗流分析模型,对工程的设计、建设、管理具有重要意义。

自1856年达西定律提出以来,渗流分析理论得到了长足的完善和发展。达西定律定量描述了稳定层流条件下的宏观线性渗流规律,其形式简单,物理含义明确,在各领域渗流机理研究中得到广泛应用。然而自然环境下岩土体内部孔隙结构和外部应力环境复杂、渗流通道蜿蜒曲折、渗流速度多变,导致达西定律不再适用,此时的流体流动状态称为非达西渗流[1-2]。工程界中非达西渗流极为常见,例如,孔隙率大、渗透性强的破碎岩体,其流速与压力梯度拟合为流速的二项式[3];孔隙中的高速渗流过程严重偏离达西定律的假定条件,降低其计算精度[4];对于裂隙面粗糙不平、裂隙网络发育的岩体,往往存在流速过大、水流惯性力显著的现象,最终诱发非达西效应[5]。对于混凝土、深埋岩石等致密低渗透性介质,渗流过程仍然呈现非达西状态,并且低速渗流过程与高流速非线性渗流过程性态相反[6]。

由此可见,非达西渗流现象常伴随着工程实际问题,其本质是由于多孔介质的特性及流体与介质之间的相互作用而导致的流速与水力梯度的非线性关系,通常可以通过物理实验、数值模拟等手段揭示其特性。影响这种非线性产生的因素多元,如流体黏度较高、复杂的孔隙结构和较大的粗糙度与迂曲度会使流体流动的阻力增加;剪切作用造成的剪缩

与剪胀效应将使有效过流通道显著变化，引发流态向紊流过渡；高渗透水压作用下新生裂隙的萌生与扩展、渗蚀过程的发生都将加剧导致更明显的非达西渗流行为。针对这些影响因素，相关的理论模型也在通过引入新的参数或调整已有参数的计算方法而被不断的修正与完善，通过这些修正模型，学者们更贴切地捕捉非达西渗流的具体特征与变化规律，对渗流过程的预测能力也在不断提升。基于此，本研究综述了非达西渗流的特征及产生机理、分析方法、影响因素和相关模型的修正，以期为水能开发、边坡稳定、石油工业、煤矿开采、地下水污染等领域的工程实践和岩土体非达西渗流理论的进一步扩展提供理论支撑。

1　非达西渗流特征及产生机理

大量研究成果与实测资料表明，岩土体中低流速或高流速将导致流速、流量与水力梯度、压力梯度之间为非线性关系。BASAK[7] 通过实验观察将多孔介质中的流态划分为低速非达西渗流、达西渗流以及高速非达西渗流，如图 1 所示。

由图 1 可知，低速非达西渗流与高速非达西渗流具有明显的非线性特征，且随着水力梯度的增加，低速非达西渗流的增速快于高速非达西渗流。这意味着达西定律会低估低速非达西渗流状态下的介质过流能力、高估高速非达西渗流状态下的介质过流能力[9]。因此这两种流态也是诸多学者关注的重点。

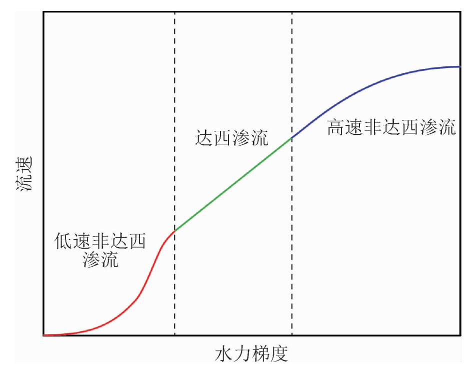


图 1　不同流态下流速与水力梯度关系曲线[8]

Fig. 1　Curve of relation between flow velocity and hydraulic gradient of different flow regime[8]

1.1　低速非达西渗流

1.1.1　低速非达西渗流特征

低速非达西渗流可称为达西渗流的下限，是由岩土体周围结合水薄膜的流变学特性所决定的[10]。1968 年，IRMAY 研究非达西渗流问题时提出最小启动梯度的概念，表明低渗低压力梯度下流体的非线性特征，即在低渗流速度下的下凹型非线性段与高渗流速度下的线性段，其特征曲线如图 2 所示。

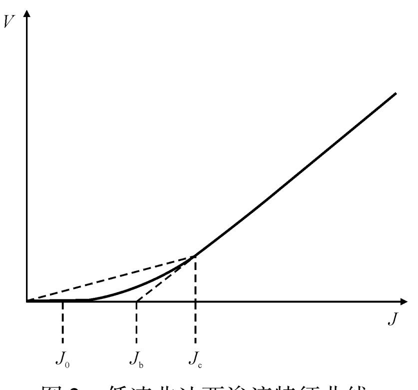


图 2　低速非达西渗流特征曲线

Fig. 2.　Characteristic curve of low-speed non-Darcy seepage

图 2 中，J_0为启动压力梯度，当 $J < J_0$时流体不发生流动；J_b是线性段的延伸，称为拟启动压力梯度；J_c为临界压力梯度，当 $J > J_c$时，流体呈线性运动规律。

关于启动压力梯度产生的原因一直是学者们研究的热潮，总体分为 3 种论调：流体论、介质论和吸着水影响论[11]。流体论代表学者 IRMAY(1968)和 SWARTZENDRUBER(1962)等，认为流体的非牛顿流变性状是导致启动压力梯度存在的主要原因。前苏联学者巴斯宁耶夫[12]是介质论的代表学者，认为流体流动时需突破流体与多孔介质之间所形成的稳定凝胶状膜，这种作用力即为启动压力梯度；王福刚等[13]提出边界层及流体黏度变化对流动非线性影响显著，且压力梯度的增大会带动黏度较大的边界层流体参与流动，使有效渗流空间逐渐增大。吸着水影响论代表学者 ENGELHARDT 和 TUNN(1955)、葛家理等[14]认为介质周围会吸附一层结合水薄膜，堵塞孔隙的过水通道，流体必须破坏吸着水膜发生流动，克服结合水膜阻力的临界梯度即为启动压力梯度。

1.1.2　低速非达西渗流产生机理

在低压力梯度下，流体偏离线性规律的原因被认为是受孔隙结构非均质性与流体非线性的影响，如孔喉狭窄、连通性差、岩石渗透率低、均质性差等[15]。岩土体中狭窄的孔隙喉道使流体有效过水面积减小，孔隙间连接受阻，喉道的弯曲、分支、死端结构增加了流体流动的阻力，导致有效渗透率下降，进而引起非线性渗流现象；流体性质主要是其密度、成分、黏滞性等物理化学性质，介质与流体共同导致

了非线性流态的发生[16]。

1.1.3 低速非达西渗流模型

1968 年,IRMAY 发现水在黏土介质中的渗流存在非线性特征,并引入最小梯度的概念[17],将 DARCY 定律修正为

$$\begin{cases} q = 0 & J < J_0 \\ q = k\boldsymbol{J}(J - J_0)/J & J \geqslant J_0 \\ J = |\boldsymbol{J}| \end{cases} \tag{1}$$

式中:k 为渗透系数;J 为压力梯度;$\boldsymbol{J}$ 为压力梯度的矢量矩阵,有 x、y、z 方向上的 3 个分量,可写作 $\boldsymbol{J} = [J_x, J_y, J_z]^{-1}$ 。

1962 年,SWARTZENDRUBER 通过分析梯度-速度资料,根据实验数据提出运动方程[17]。

$$\begin{cases} q = 0 & 0 \leqslant J < J_0 \\ q = b[J - \exp(-cJ)] & J \geqslant J_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中:b、c 为与流体和介质性质相关的常数。

IRMAY(1968)与 SWARTZENDRUBER(1962)给出的运动方程都揭示了启动压力梯度的存在,但缺乏对曲线下凹非线性段的解释。而后,学者们通过理论分析与实验研究,给出了不同表达下的低速渗流运动方程,秦峰[11]和黄延章[18]给出了考虑下凹非线性段的运动方程,即

$$\begin{cases} v = 0 & J \leqslant J_0 \\ v = a_1 (J)^{\zeta} & J_0 < J < J_c \\ v = k(J - J_b) & J \geqslant J_c \end{cases} \tag{3}$$

式中:a_1、ζ 为与流体和介质性质相关的常数。

姚约东等[19]通过分析岩心流动实验的 λ-Re 曲线,将低速渗流分为 5 段,并给出统一方程,即

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = cv^z \tag{4}$$

式中:z 为渗流指数,介于 0 ~ 2 之间,与流态有关;c 为与流体和介质性质相关的常数。

目前,低速非达西渗流模型均揭示了低速渗流下存在启动压力梯度,其研究和应用热点集中于低渗透油气田的开采中,在其他领域的研究与应用还需进一步深入。

1.2 高速非达西渗流

1.2.1 高速非达西渗流特征

高速非达西渗流也称为达西渗流的上限,在水利工程中极为常见。一般以临界雷诺数(Re_c)来界定,如式(5)所示,雷诺数的物理意义被定义为黏滞力与惯性力的比值。有学者认为,只要根据平均粒径计算的雷诺数在 1 ~ 10 之间,则其流态为层流,渗透流速与水力坡降呈线性关系[17],若雷诺数超过该范围,流态将逐渐过渡为紊流,渗流偏离达西定律。

$$Re = \frac{\rho v d}{\nu} \tag{5}$$

式中:Re 为雷诺数,$Re > Re_c$时出现高速非达西渗流;ρ 为流体密度;v 为渗流速度;d 为介质颗粒直径;ν 为动力黏滞系数。

1.2.2 高速非达西渗流产生机理

随着流体渗流速度的提高,雷诺数增大,流体中的惯性力逐渐平衡黏滞力并占据主导地位[20],形成紊乱、不规则的紊流态,流场中出现涡流区(图 3),该现象在高速水流和变径渗流通道中更为显著。

CHENG 等[21]基于试验数据的拟合结果,发现小雷诺数时黏滞力占主导地位,高雷诺数时惯性力对流态的贡献将大于黏滞力。CHAUVETEAU 和 THIRRIOT(1967)曾在可观测流线的二维管道交替扩张和收缩的标准模型中进行实验,观察到当 $Re <$ 2 时,流动符合达西定律;当 Re 变大时,流线发生变化,在扩张区出现稳定的涡流,随着 Re 的增大,漩涡逐渐变大并开始向外扩展,直至整个流动区域发展为紊流状态[17]。ZOU 等[22]模拟三维粗糙裂隙的非线性渗流,发现随着 Re 增加,整个裂隙空间中的流动曲折度显著增加,在流动主方向上出现涡流区,表面的粗糙程度促使了涡流的发展,并存在局部涡流回流,流线曲折紊乱,非达西效应显著。此外,当渗流通道形状发生变化时,流体局部水头增大,惯性力作用显著,导致非线性现象增强。ZHANG[23]采用荧光示踪法,捕捉不同流速下水流通过空腔时的运动轨迹,结果表明随着流速的增加,腔体内流动轨迹减小与涡流的增大反映了黏滞力与惯性力的演化,且涡流形成发展耗散能量,由此造成的压力损失是导致非线性渗流的原因。

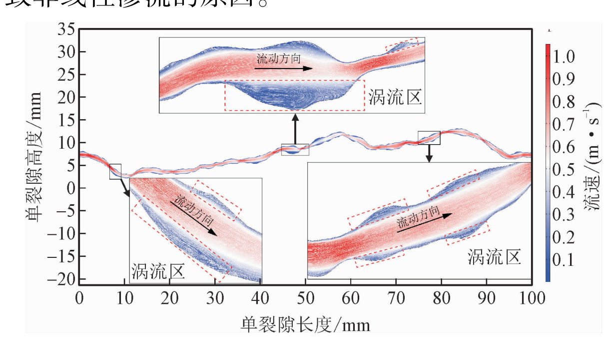


图 3 高速非达西渗流中的涡流现象[24]

Fig. 3 Vortex phenomena in high-speed non-Darcy seepage[24]

1.2.3　高速非达西渗流模型

描述高速非达西渗流的运动方程可分为平方形式与指数形式[25]。平方形式下的 FORCHHEIMER 方程形式简单、参数较少、应用方便,其描述压力梯度与渗流量的关系如下[26]。

$$-\nabla P = AQ + BQ^2 \tag{6}$$

式中:A 为线性项系数;B 为非线性项系数。

FORCHHEIMER 定律为拟合公式,其中 AQ 线性项代表黏滞力的影响,BQ^2 非线性项代表惯性力的影响,可同时反映出多孔介质中达西与非达西的渗流特性[27]。线性项系数 A 与非线性项系数 B 可通过 $-\nabla P$-Q 曲线回归分析得到,或根据式(7)计算[28]。

$$A = \frac{\mu}{kA_s},\quad B = \frac{\beta\rho}{A_s^2} \tag{7}$$

式中:μ 为动力黏滞系数;k 为渗透率;A_s 为过流面积;β 为非达西渗流系数,代表惯性力的大小。

应用 FORCHHEIMER 定律时最大的难点在于非达西渗流系数 β 的选取。孔隙结构、介质性质、流体性质等均会影响 β 的取值。MACINI 等[29]以玻璃珠和细砂作为多孔介质,开展渗流试验,发现非达西渗流系数受颗粒介质表明光滑程度、粗糙度和曲折率的影响。李新东等[30]采用 BP 神经网络,对黄河滩地砂卵石介质的 k 和 β 建立预测模型,有较好的检验精度,可满足工程实际需求。GEERTSMA[31]提出 β 与渗透系数 $k^{0.5}$ 和孔隙率 $\varphi^{5.5}$ 的乘积呈反比关系,在致密和松散砂岩、石灰岩、白云岩的非线性流动中均适用。马亚楠等[32]建立了各向异性裂隙渗流的双参数模型,得出 β 与一阶导数均方根 Z_2^{α} 呈正比,与等效水力开度 e_h 呈反比。黄先伍等[33]开展破碎砂岩稳态渗透实验,得到砂岩的 k 和 β 与孔隙率 φ 近似呈幂函数关系。许凯等[27]基于数值模拟手段,定义 B 与 v 的乘积来反映非线性程度,得出水电工程中 β 的合理取值范围应在 $8.13\times10^5\ \mathrm{m}^{-1}$ 以内,并给出 β 的计算关系式。

指数形式下的运动方程为 IZBASH 公式,是通过分析大量实验数据得到的纯经验公式[34],表达式为

$$-\nabla P = \lambda Q^m \tag{8}$$

式中:λ、m 为经验系数;当 $m=1$ 时,IZBASH 公式退化为线性关系,此时 λ 对应于 FORCHHEIMER 公式的线性项系数;当 $m=2$ 时,IZBASH 公式表示紊流状态,此时 λ 对应于 FORCHHEIMER 公式的非线性项系数;m 值的变化表示不同的流态变化,其大小反映渗流流态偏离线性流的程度[35]。

IZBASH 公式是基于经验推导的,适合描述湍流效应引起的高速非达西流[36],但其经验系数还未有统一的表征与量化,不少学者对其展开了研究。TZELEPIS 等[37]基于光滑裂隙渗流试验结果拟合得出,随着裂隙隙宽的增大,λ 和 m 呈现先增大后减小的趋势。RONG 等[38]也得出不同隙宽条件下的 λ 和 m 值符合相同的变化规律,但其相互关系与对裂缝几何形态的响应程度还需进一步探明。XING 等[39]开展室内试验以量化表征 IZBASH 公式经验系数,分析得层流时 λ 与非达西效应因子 E 正相关;流态由层流过渡至紊流时,λ 与 E 负相关,而 m 与 E 一直呈正相关关系。CHENG 等[21]通过数值模拟,发现经验系数 λ 和 m 间是相互关联的,均随雷诺数变化且依赖于流速大小,在给定数据集下 λ 和 m 的取值可相互推算。QIAN 等[40]阐明了 λ 和 m 值与裂隙隙宽呈负相关,与粗糙度呈正相关关系,并基于试验数据拟合出两系数推求经验方程式 $m = 1.685e^{0.0019\lambda}$,但其适用范围仍具有一定的局限性。

综上所述,FORCHHEIMER 公式与 IZBASH 公式均能较好地表征水力梯度与流量的非线性关系,FORCHHEIMER 公式因有较为清晰的理论背景而应用更为广泛[36]。毛迪凡[41]进行 4 种孔隙介质的渗流沿程阻力实验,拟合数据分析,随着流速的增大,两公式的相对误差也逐渐增大,而 FORCHHEIMER 方程对整个渗流过程的拟合具有较高精度。李文亮等[42]指出 FORCHHEIMER 公式非线性系数可对渗流惯性效应与渗透失稳机制进行良好表征,渗流试验中破碎花岗岩裂纹的闭合与扩展密切影响非线性系数;同时 IZBASH 公式非线性系数可反映低渗介质非线性渗流的固液界面效应与惯性效应,系数与围压存在幂函数关系。

从上述分析看来,FORCHHEIMER 公式与 IZBASH 公式之间存在一定的关系,两者的关联性研究很有可能在诸如对非线性流场数据拟合的相互印证、求解浸润线位置时评估经验参数以及选用有限差分法、有限元等不同方法求解计算时提高精度作

出一定的贡献[43]。PARKIN[44]提出求解多孔介质湍流场时易于从二次型方程入手,但可能需要转化为指数方程。ZHANG 等[35]基于 FORCHHEIMER 公式修正了 IZBASH 公式,得出 IZBASH 公式参数的具体表达式(9),将 IZBASH 公式参数与 FORCHHEIMER 公式中综合反映裂隙几何特征的参数 A、B 联系起来。

$$\lambda = \frac{B}{m-1}\left(\frac{A}{B}\frac{m-1}{2-m}\right)^{2-m},\quad m = 1 + \frac{1}{\frac{A}{BQ}+1} \tag{9}$$

GEORGE[43]采用流速-梯度形式的 FORCHHEIMER 公式 $J = rv + sv^2$ 与 IZBASH 公式 $J = a'v^N$,从数学角度建立了两方程系数的相互转化模型式(10)、式(11),在 $m = 1 \sim 2$ 的过渡流态下误差可忽略不计,适用于非线性渗流中经验参数的相互印证。

$$r = \frac{12a'(v_{\max})^{N-1}(2-N)}{(N+2)(N+3)},\quad s = \frac{20a'(v_{\max})^{N-2}(N-1)}{(N+2)(N+3)} \tag{10}$$

$$N = \frac{5r + 6sv_{\max}}{5r + 3sv_{\max}},\quad a' = \frac{(5r + 4sv_{\max})(4r + 3sv_{\max})}{4(5r + 3sv_{\max})(v_{\max})^{N-1}} \tag{11}$$

式中:r、s 分别为流速-梯度形式下 FORCHHEIMER 公式的线性项系数与非线性项系数;a'、N 分别为流速-梯度形式下 IZBASH 公式的经验系数;$v_{\max}$为最大渗流速度。

2 非达西渗流分析研究方法

2.1 物理试验研究方法

物理试验方法是探究流体渗流特性的基本手段,有助于学者掌握参数的时变规律并以此建立数值计算模型。主要分为原位大尺度现场试验与室内小尺度模型试验,原位试验是在一定研究域内自然状态的岩土体上直接进行试验,减少了对介质的人为扰动,所得数据与介质真实情况拟合最好,更具工程实用价值,如原位渗透试验、压水试验等。但进行原位试验费时费力,只能得到当下工况的岩土体物理几何参数,而无法预测因工程开挖扰动后岩土体的变形与破坏特性,试验对象有限,普适性差。室内物理试验可在一定程度上弥补这些缺陷,并进行大量参数可控的渗流试验,还可以叠加温度场、应力场等边界条件,以反映更真实的岩土体性状。

裂隙介质的试样通常采用巴西劈裂[45]、3D 打印[46]、人工加粗[47]等方法来模拟天然状况下的粗糙裂隙。甘馥硕[45]考虑在拉应力条件下形成的张拉裂隙破坏特征,用改进巴西劈裂法制备人工张拉性裂隙,自主搭建圆柱状岩样渗流试验平台,开展不同流态与流体性质的渗流试验,发现裂隙渗流的非线性特征显著,可用 FORCHHEIMER 公式很好的拟合,并建立了惯性渗透系数与裂隙几何性质和流体性质的参数化表征模型。王帅等[46]研制了图 4 所示的试验机开展单轴压缩条件下的粗糙裂隙渗流试验。

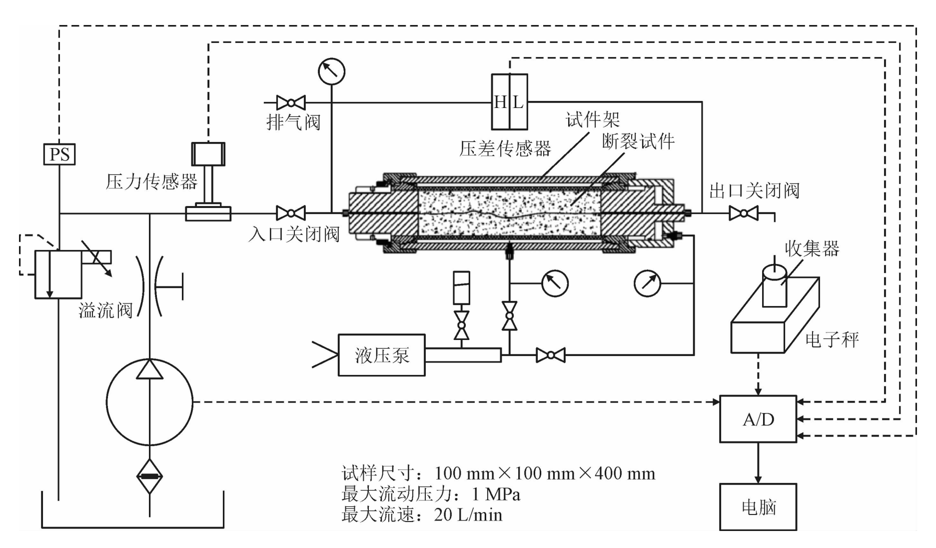


图4 粗糙裂隙渗流试验装置系统示意图[46]

Fig. 4 Schematic diagram of seepage testing device system in rough fracture[46]

该装置包含的法向加载系统可提供垂直于裂隙渗流方向的法向荷载;模拟裂隙系统用于放置及密封裂隙,保证渗透水流只从试样两端流入和流出;裂隙法向方向的位移检测器可实时动态测量裂隙隙宽变化;供压系统中的液压泵可以防止反抽,在整个试验过程中提供稳定的水压。结果表明,在无法向压力条件下,粗糙度与渗透系数呈负指数减小趋势,粗糙度造成的表面凸起阻断了水体自由流动,如图 5 所示,在Ⅰ区域处流体加速减压,惯性作用增加,形成涡流,随着流动时能量损失的增大,在Ⅲ区域处流速近似为 0,但因惯性使该处出现回流,造成了整个流态的非线性;在法向压力恒定情况下,单轴压缩下流体需克服粗糙度引起的渗流阻力和法向压力产生的阻力,随水压增加,流速增加,惯性效应和流动能量也随之增大。

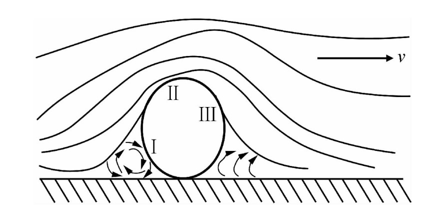


图 5 流体在粗糙裂隙中流动示意图[46]

Fig. 5　Schematic diagram of fluid flow in rough fracture[46]

孔隙介质的试样多为颗粒堆积的人造多孔试样,来开展多条件渗流试验[48-49]。杨斌等[48]用堆积型钢球模拟破碎岩体,开展高水力梯度下堆积型多孔介质高速非线性渗流试验,得出小粒径多孔介质相对于大粒径多孔介质产生非线性流动的临界水力梯度更高,渗透率与非达西渗流影响系数呈负指数关系,随着渗透率的增加,非达西渗流影响系数逐渐减小。史海明[49]对高温烧结成型的铜粉圆柱状颗粒堆积试样进行常规三轴压缩条件下的水渗流试验,以获得孔隙介质渗透率的变化规律。其渗流系统试验台由加载系统和测试系统组成,加载系统为整个试验提供三向荷载,测试系统可监测水头压差及孔隙水压力。通过试验结果分析,颗粒堆积的多孔介质试样渗流规律符合低速非达西特征,存在起始水力梯度,且渗透系数将随轴向压力和侧向压力的增大而逐渐减小。

此外,针对渗流过程中的渗蚀和渗透破坏作用,魏海江等[50]自行设计包含供水、渗蚀腔、土-水分离系统及数据采集系统的渗蚀装置(图 6),探究逐级加载水力梯度条件下流失细颗粒的粒度分布及流失引起的土体孔隙结构变化情况,得出渗蚀的敏感性与细粒粒径大小负相关,而水力梯度与孔隙的控制收缩尺寸和不均匀系数正相关,与分形维数负相关,并通过灰色系统理论分析指出分形维数和控制收缩尺寸将是土体渗蚀破坏评估准则研究时的重要参数。

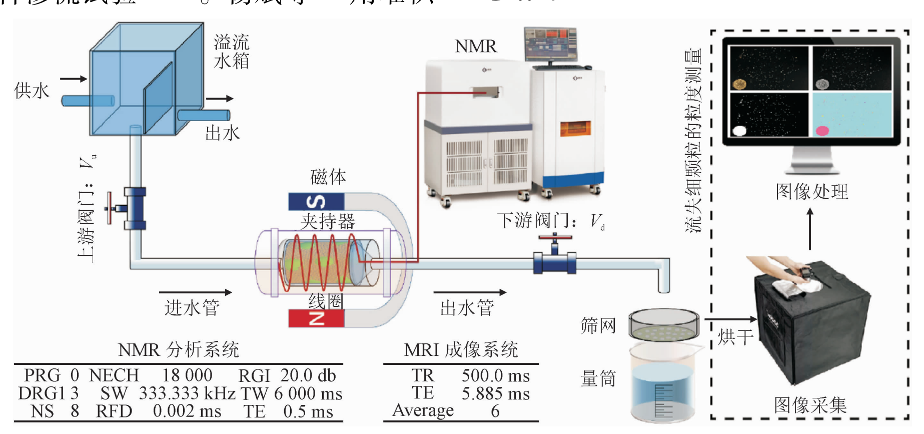


图 6　渗蚀试验装置结构图[50]

Fig. 6　Structure diagram of erosion test apparatus[50]

2.2　数值模拟研究方法

尽管上述试验方法可提供裂隙介质和孔隙介质详尽的物理参数,但实际地质环境中岩体多为相互交织紧密相连的复杂裂隙网络和孔隙基质构成,室内实验无法完整且精准地捕捉裂隙岩体的多元性及整体性。因此需借助数值模拟技术,建立符合工程实际的计算模型,结合裂隙、孔隙渗流规律,以宏观视角分析裂隙与孔隙之间的相互作用及裂隙岩体整体渗流规律的动态演化过程,为解决复杂工程地质问题提供更加准确、可靠的理论支撑。

数值模拟求解的基本方程是根据水流连续性方程,得到的稳定渗流基本微分方程,即[51]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right) + \omega = 0 \tag{12}$$

其定解条件仅含边界条件,可分为以下几类。

第一类边界条件(Dirichlet 条件):当渗流区域的某一部分边界(如 $S1$)上的水头已知,法向流速未知时,其边界条件可以表述为

$$H(x,y,x)\big|_{S1} = \varphi(x,y,z),\ (x,y,z) \in S1 \tag{13}$$

第二类边界条件(Neumann 条件):当渗流区域的某一部分边界(如 $S2$)上的水头未知,法向流速已知时,其边界条件可以表述为

$$k\left.\frac{\partial H}{\partial n}\right|_{S2} = q(x,y,z),\ (x,y,z) \in S2 \tag{14}$$

自由面边界和溢出面边界条件:无压渗流自由面的边界条件可以表述为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial H}{\partial n} = 0 \\ H(x,y,z)\big|_{S3} = Z(x,y),\ (x,y,z) \in S3\end{cases} \tag{15}$$

溢出面的边界条件为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial H}{\partial n} < 0 \\ H(x,y,x)\big|_{S4} = Z(x,y),\ (x,y,z) \in S4\end{cases} \tag{16}$$

基于以上稳定渗流微分方程和边界条件,借助 COMSOL、FLUENT 等求解器可以高效求解工程岩土体的渗流稳定问题。其中裂隙型岩体数值模型分为等效连续介质模型、离散裂隙网络模型和双重介质模型。

等效连续介质模型可使用有限差分法、有限元法、边界元法、有限分析法等数值解法进行求解,适用于规模较小、数量众多且分布密集的微小裂隙岩体,如可应用于大坝坝体和坝基裂隙岩体的渗流模拟以预测渗漏风险位置。该模型将裂隙岩体宏观上视为一个整体,将裂隙中的透水性平均到整个岩体中,其求解的重要参数为岩体表征单元体(representative elementary volume,REV)及三维渗透张量。通常若研究的岩体尺寸大于或等于一个临界值时,其渗透特性稳定不再发生变化,该临界体积即为表征单元体,此时描述渗透能力的物理量即为渗透张量。ZHOU 等[52]基于流动耗散能的叠加原理,提出了一种计算裂隙岩体渗透张量的新方法,并计算了拉西瓦水电站现场裂隙岩体的渗透性张量和 REV 大小,经现场水力学试验验证具有可行性。

离散裂隙网络模型不考虑岩块的渗流,将裂隙作为非连续网格处理,应用该模型时需对研究区域内的裂隙分组并获得其空间位置分布参数,采用 Monte-Carlo、LHS(拉丁超立方抽样)等随机方法建立二维(图 7)或三维(图 8)裂隙网络。

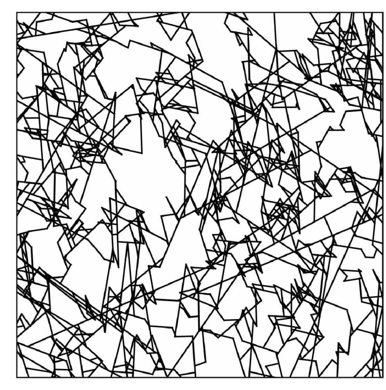


图 7 二维离散裂隙网络模型[53]

Fig. 7 Two-dimensional discrete fracture network model[53]

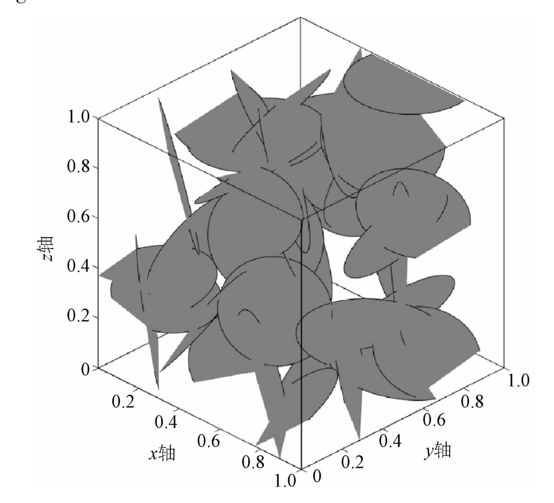


图 8 基于 Baecher 圆盘假设的三维离散裂隙网络模型

Fig. 8 Three-dimensional discrete fracture network model based on Baecher hypothesis

目前二维裂隙网络模型应用广泛,但因其难以反馈自然条件下裂隙的空间几何复杂特性,国内外学者更关注于三维裂隙网络的求解计算。三维裂隙网络模型以单裂隙的流体流动规律为基础,基于立方定律建立求解控制方程,能够较好地描述裂隙岩体的渗流特征,可应用于岩质边坡失稳、围岩及地下硐室渗透稳定性计算等工程场景,但当裂隙过于密集时,该模型求解计算量极大,且对于大的构造节理与微小裂隙组合区域的求解具有局限性。LI 等[54]采用离散裂隙网络模拟天然裂隙岩质边坡,用有限元法进行强度折减分析,将岩体离散化为实体单元,裂隙以摩擦接触界面单元模拟,定位了边坡临界滑

移面,评估了安全系数,该方法为高断裂岩质边坡的变形响应和滑动破坏模式提供研究手段。

双重介质模型将岩体内的渗流运动看作裂隙导水、孔隙储水,在裂隙、孔隙交界处存在双重水头,水头差异与介质的相对渗透系数有关,需考虑两类介质的水相交替过程。WARREN 等[55]将实际岩体中的渗流运动看作是岩体被多组等距等隙宽的正交裂隙所切割的模型,同样考虑了岩块内孔隙与裂隙的水相交替进行求解。而后仵彦卿[56]将双重介质模型划分为狭义双重介质和广义双重介质。狭义双重介质定义为孔隙介质与裂隙介质共存于一个岩体系统中形成的具有水力联系的含水介质;广义双重介质定义为连续介质和非连续介质共存于一个岩体系统中形成的具有水力联系的含水介质。狭义双重介质根据实际岩体裂隙展布和岩块形状,分别建立裂隙系统和岩块孔隙系统渗流数学模型,以裂隙壁为两系统边界条件,裂隙交叉点作为数值计算的节点来求解;广义双重介质则根据连续介质和非连续介质接触处的水头连续性及流量平衡原则来建立耦合方程进行求解。但目前该模型两介质间的物质交换系数难以确定,无法体现岩体渗流的各向异性及非均质性,因此应用范围并不广泛。

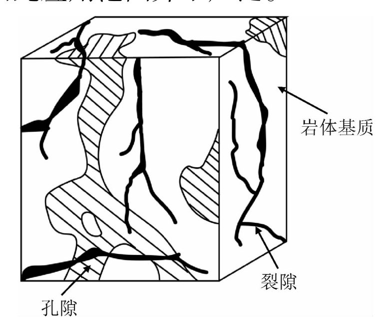


图 9　孔隙-裂隙的双重介质模型[55]

Fig. 9　Dual media model of porosity and fracture[55]

对多孔介质来说,传统宏观模型将多孔介质假设为理想连续体,忽略由微观孔隙结构变化所带来的渗流、物质运移等现象的机理解释。随着多孔介质孔隙结构模型的发展,目前求解孔隙介质渗流问题的数学模型主要分为孔隙重构模型、孔隙网络模型以及等效孔隙网络模型[57],这些模型的构建为评估油气储层产能、求解孔隙型岩土体渗流特性以及掌握污染物在地下环境中的运移扩散规律等方面提供了重要手段。

孔隙重构模型是对多孔介质内部孔隙结构的细致复现,并直接对渗流过程控制方程进行求解的模型。对于粗粒土来说,获取其孔隙率、级配等参数即可用离散元手段来重构内部孔隙结构(图 10),且在其颗粒接近球形,孔隙连通率较好时模拟效果最佳;对于岩石来说,可通过扫描试样的二维图像并基于图像算法来重构三维数字图像,即数字岩芯。对孔隙重构模型进行求解时,主要采用计算流体力学法(computational fluid dynamics,CFD)方法和格子玻尔兹曼法(lattice Boltzmann method,LBM)方法[57]。CFD 方法以欧拉方程和 N-S 方程作为控制方程,使用有限差分、有限体积、边界元等离散方法对控制方程求解。LBM 方法则是通过求解离散介观尺度的 BOLTZMANN 方程来再现微纳尺度下的渗流问题,适用于具有复杂几何边界的多孔介质流动模拟。MAHMOODLU 等[58]建立了砂样的球堆积重构模型,图 11 即为重构后的堆积体及孔体、孔喉模型,基于此研究了不同掺砂比及密实程度下的砂样微观渗流变化规律。闫国亮等[59]通过模拟岩石形成的沉积-压实-成岩作用,由岩石二维切片图像重建了三维数字岩芯,如图 12 ~13 所示。SANEMATSU 等[60]通过 CT 扫描砂岩二维图像重构砂岩数字岩芯,用有限元法求解渗流运动方程,并基于流场计算结果用拉格朗日粒子追踪法来掌握孔隙通道中纳米颗粒的运移情况。

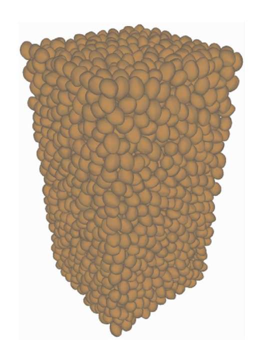


图 10　基于离散元手段的孔隙重构模型[57]

Fig. 10　Pore reconstruction model based on discrete element method[57]

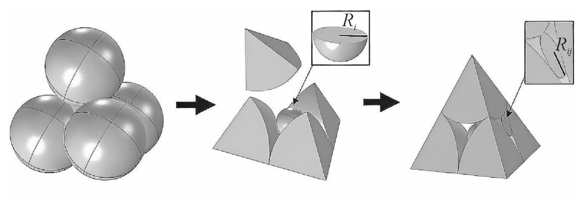


图 11　孔隙结构模型示意图[58]

Fig. 11　Schematic diagram of pore structure model[58]

孔隙网络模型是将孔隙结构简化为以球体代表的孔腔和以圆柱体代表的孔喉[61],并采用四面体剖分法[62]、居中轴线法[63]、最大球法[64]等提取孔隙结

构的建模方法。对于孔隙网络中的单相渗流问题，通常假设模型中各孔隙压强相同，流入每个孔隙的流量符合质量平衡原则，渗流过程可以用 Hagen-Poseuille 管流方程求解[65]。GAO 等[65]基于此方法探究了不同粒径多孔介质孔隙结构的渗透系数，与试验结果拟合较好。谭彩等[66]使用工业 CT 扫描岩样获取数字岩芯，选取孔隙度变化较小的代表性单元构建孔隙网络模型，进行渗流分析发现，较大孔隙内流速和流量更大，高流速的渗流路径更集中，流线更顺滑，而小孔隙内的渗流路径较为分散，随水压的增大，孔隙结构逐步发育，促进连通孔隙向微裂隙转变。

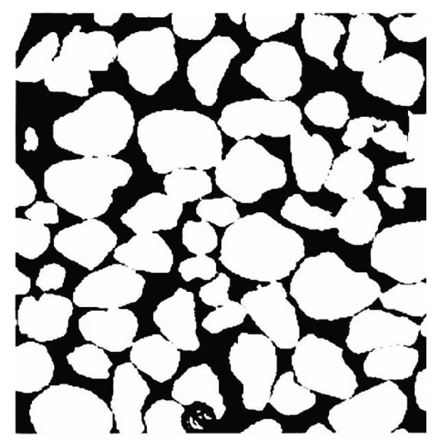


图 12 二维岩石切片[59]

Fig. 12 2D rock slice[59]

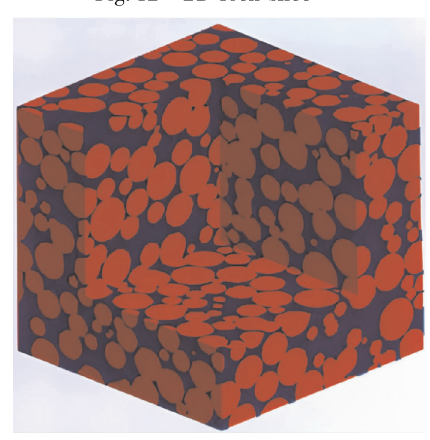


图 13 三维数字岩芯[59]

Fig. 13 3D digital core[59]

等效孔隙网络模型则是在孔隙网络模型的基础上，以多孔介质孔隙结构的特征参数代替对其的细致重构模拟，将孔隙排列在一定规则的网格顶点上，生成连接孔喉，以此实现对孔隙拓扑结构的简化，具体结构可参考图 14。JERAULD 等[67]对孔隙重构模型与等效孔隙网络模型的渗流计算结果进行对比，发现两者计算结果相当，具有等效性。

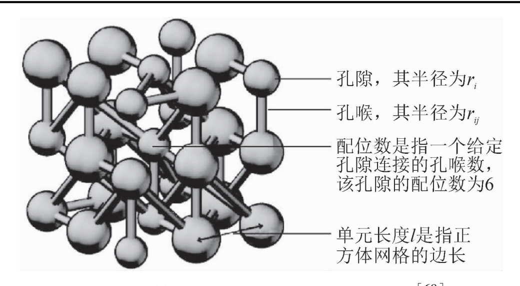


图 14 等效孔隙网络模型示意图[68]

Fig. 14 Diagram of equivalent pore network model[68]

2.3 数学解析研究方法

解析方法通过建立数学模型来求解简单条件下的渗流问题，可得到渗流参数的精确解或具有一定精度的近似解，是分析和预测流体流动规律的基石。基于流体力学经典的动量方程（Navier-Stokes 方程），可描述裂隙岩体中黏性不可压缩流体的单相流运动，同时该方程也清晰地揭示了压力梯度、黏滞力项与惯性力项间的相互关系。朱红光[69]以隙宽为 e、流程为 L 的二维岩体粗糙裂隙为例，设裂隙中水流流动方向为 x 方向，分析了由 N-S 方程推导求得裂隙岩体立方定律的解析方法，具体推导过程及适用条件如下。

在直角坐标系中，N-S 方程的分量形式为

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{17}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{18}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{19}$$

式中：u、v 分别为 x、y 方向的流速；P 为压力。

假设裂隙中 x 方向的特征流速为 U，则式(17)可变形为式(20)，且由量级分析可推，u 是 U 量级，v 是 $U\dfrac{e}{L}$ 量级。

$$v=-\int_0^y\frac{\partial u}{\partial x}\mathrm{d}y \tag{20}$$

若 $\delta=\dfrac{e}{L}\ll 1$，则 v 相比于 u 来说可以忽略不计，分析式(18)中惯性力与黏性力的比值，得

$$\frac{\rho\left|u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}\right|}{\mu\left|\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right|}=\frac{\rho\left|u\dfrac{\partial u}{\partial x}\right|}{\mu\left|\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right|}\sim\frac{\rho}{\mu}\frac{U\dfrac{U}{L}}{\dfrac{U}{L^2}+\dfrac{U}{e^2}}=\frac{\rho Ue}{\mu}\frac{\delta}{\delta^2+1}=Re\delta \tag{21}$$

若 $Re\delta\ll 1$，则惯性力相较于黏性力可以忽略

不计，式(18)退至 $-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}=0$，此时沿截面积分即可得裂隙渗流的立方定律。

$$q=\int_e u\mathrm{d}y=-\frac{e^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial x}=-\frac{e^3}{12\mu}J \tag{22}$$

由以上推导可以看出，立方定律是在可忽略流体惯性力的条件下成立的，且隙宽远远小于渗流流程，当 δ 越小时，越可使较高雷诺数下的渗流运动满足立方定律，当 Re 越小时，立方定律越适用于求解粗糙裂隙中的渗流运动。

基于多孔介质层流运动的阻力关系，对达西定律推导验证如下[10]：取沿流线 s 方向的长为 $\mathrm{d}s$、断面积 $\mathrm{d}A$ 的单元微分体，该单元体的受力情况如图 15 所示，在两端孔隙水压力、水流自身重力以及孔隙通道壁面对水流的摩擦力 F 的作用下动态平衡。

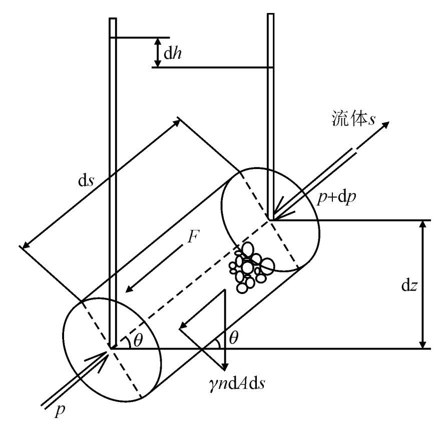


图 15　渗透水体的受力情况[10]

Fig. 15　The force of permeating water[10]

沿流线方向力的平衡关系为

$$pn\mathrm{d}A-(p+\mathrm{d}p)n\mathrm{d}A-\gamma n\mathrm{d}s\mathrm{d}A\sin\theta-F=0 \tag{23}$$

将 $\sin\theta=\mathrm{d}z/\mathrm{d}s$ 与 $\mathrm{d}p=\gamma(\mathrm{d}h-\mathrm{d}z)$ 代入式(23)可得

$$\gamma n\mathrm{d}A\mathrm{d}h+F=0 \tag{24}$$

依据 Stokes 的颗粒层流阻力关系式，即

$$D=3\pi\mu dv' \tag{25}$$

式中：D 为拖引力；d 为颗粒直径；v' 为颗粒周围沿渗流方向的局部平均流速。

若土体中的颗粒数为 N，引入球体系数 $\varphi=\pi/6$，则总摩擦阻力 F 为

$$F=DN=\frac{3\pi(1-n)\mathrm{d}A\mathrm{d}s}{\varphi d^3}\mu dv' \tag{26}$$

将式(26)代入式(24)，且断面平均流速 $v=nv'$，渗透坡降 $J=-\mathrm{d}h/\mathrm{d}s$，可得

$$v=\frac{\varphi n^2}{3\pi(1-n)}d^2\frac{\gamma}{\mu}J \tag{27}$$

令 $C=\frac{\varphi n^2}{3\pi(1-n)}$，再令 $k=Cd^2\frac{\gamma}{\mu}$，则可推导得达西定律一般形式 $v=kJ$。

除此之外，还有学者在经典理论方程的基础下推导出更适用于复杂渗流工况下的求解方程，如朱海军等[70]用伽辽金有限元法导出非线性控制方程组，可适用于任何复杂介质的三维无压非线性渗流分析，与模拟结果十分吻合。熊峰等[71]基于有限体积法推导了孔隙介质达西渗流及裂隙介质 FORCHHEIMER 方程的离散元格式，考虑两者的耦合效应采用压力交换函数来描述，给出了孔隙-裂隙双重介质非线性渗流计算新方法。

3　非达西渗流影响因素分析

由于岩土体内部空隙由孔隙和裂隙组成，其形态决定渗流通道的大小、位置和连通性，对渗流流态影响显著。此外，在剪切破坏等外力作用下岩土体内部空隙结构变化显著。同时渗流压力是导致水流惯性力增强的关键因素。因此，本研究从岩土体空隙结构几何特征、剪切作用、渗流压力等角度综述分析了岩土体非达西渗流影响因素。

3.1　空隙结构几何特征影响

3.1.1　裂隙结构影响

岩体内节理裂隙是地下水流动及溶质运移的主要通道，裂隙的内部几何特征(图 16)如开度、粗糙度、充填程度、匹配度等将共同影响岩体渗透特性，也是造成裂隙渗流复杂曲折的原因。

节理面的非均质性主要体现在裂隙粗糙度上。粗糙度可利用粗糙度系数(joint roughness coefficient，JRC)表征，BARTON[72]通过推导岩体结构面峰值抗剪强度公式提出，而后又给出了十条典型节理轮廓面来评估 JRC 值，多数实验及数值模拟均基于此展开[73-74]。有研究表明，裂隙粗糙度的存在增强了渗流过程中的惯性作用，表面的凸起下凹使流体流动时的接触面积与摩擦阻力增大，流动路径更加曲折、流线长度更长，造成惯性损失，在高流速下尤为显著[75]。RASOULI 等[76]模拟了不同 JRC 值下的流动通道，并建立了估算粗糙裂隙水力参数的相关关系。陈雷等[74]认为裂隙面粗糙度与隙宽大小

决定了达西-非达西渗流的演变趋势，并基于试验结果拟合得临界雷诺数 Re_c 与粗糙度 JRC 和隙宽 e 的经验公式(28)。

$$Re_c = -49\mathrm{JRC} + 206e + 1\,232 \tag{28}$$

填充 粗糙度 接触面积

粗糙裂隙 剪切作用 迂曲度 空间相关度

不均匀隙宽

图 16 裂隙内部几何特征

Fig. 16 Geometric characteristics of internal fracture

熊峰等[77]对 JRC≤10 的低粗糙度裂隙建立了临界雷诺数 Re_c、绝对粗糙度 s 和水力隙宽 e_h 的经验公式(29)，得出裂隙开度越小，粗糙度越大，将造成更强烈的非线性作用。

$$Re_c = -17.21\ln\left(100\,\frac{s^4}{e_h^3}\right) \tag{29}$$

贺玉龙、杨金保等[78-79]研究认为，裂隙岩体渗透特性与裂隙开度、受力状态、表面粗糙度有关，不同 JRC 值的单裂隙渗透率与围压呈负指数关系，且在围压卸载时，渗透性能的恢复有明显的滞后效应。AZIZMOHAMMADI 等[80]分析了不同区域天然裂隙数据，指出裂隙面的粗糙度也会直接影响裂隙开度。赵明凯等[81]建立了以相对粗糙度 ξ、裂隙开度分布分形维数 D_f、方位角 ψ、倾角 θ 以及有效裂隙度 φ 的粗糙裂隙渗透率计算模型，表达为式(30)，得出渗透率与裂隙最大开度呈二次方关系，开度越大，通过裂隙的流体体积越大，渗透率越大的结论，该模型不含经验常数，具备更好的适用性。

$$k = \frac{(1-\xi)^2(2-D_f)(1-\cos^2\psi\sin^2\theta)\varphi e_{\max}^2}{12(4-D_f)(1-\varphi)} \tag{30}$$

裂隙的迂曲度 τ 受裂隙壁面不规则起伏及裂隙隙宽影响，被定义为裂隙内实际渗流路径长度 L 与岩石表观长度 L_x 的比值(图 17)。

$$\tau = L/L_x \tag{31}$$

式中：L 为实际渗流长度；L_x 为岩石表观长度。

GE[82]基于质量守恒原理，引入迂曲度的影响，建立了稳态条件下粗糙裂隙不可压缩层流运动的控制方程。MURATA 等[83]将物理试验与数值模拟相结合，描述了粗糙裂隙渗流规律偏离立方定律的现象，分析结果表明，当裂缝上下表面接触面积增大时，迂曲度也随之增大，迂曲度的影响造成的偏离现象最为显著，并给出了与迂曲度相关的渗透系数修正方程。BELEM 等[84]提出用表面弯曲系数 T_s(T_s 定义为粗糙裂隙面实际的表面面积 A_t 与投影面积 A_p 的比值)来量化迂曲度。XIAO 等[85]表明迂曲度及粗糙度对裂隙中流体流动偏离立方定律的影响较大，将 τ、T_s 及相对粗糙度引入立方定律的修正中，与不同时考虑以上参数的 Lomize 和 Louis 方程对比发现，当相对粗糙度较大时，Lomize 和 Louis 方程将低估 9% ~31% 的流量。

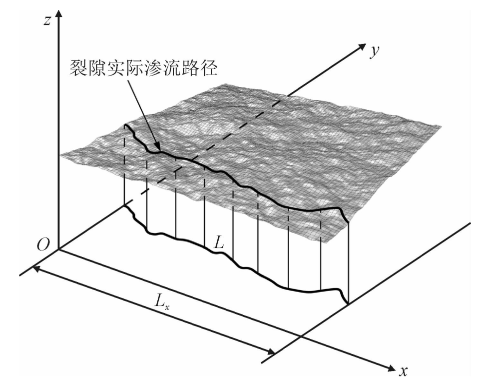


图 17 裂隙流动路径示意图[83]

Fig. 17 Schematic diagram of fracture flow path[83]

构造作用和风化作用形成的岩体裂隙中充填着的各种物质，其充填物性质、充填程度等影响充填裂隙岩体的渗透特性。速宝玉等[86]提到充填颗粒的物理性质及孔隙度会影响充填裂隙的渗透性。于龙等[87]在光滑平行板填砂试验中指出充填裂隙的水流流态多为层流，且与充填物的尺度比密切相关。刘杰等[88]进行有、无充填砂的对比试验，发现相同应力水平下充填砂粒的渗流量是未充填砂粒的 10 倍以上。陈金刚等[89]发现裂隙充填物的拉张效应与剪切效应、塑化和液化效应将使裂隙渗透性显著增大，可能是充填物在水的作用下软化并逐渐流失，裂隙有效过流面积增大的原因。刘才华等[90]探究充填砂裂隙的剪切渗流特性，在相同条件的剪切作用下，当剪切位移由 0 增加至 0.591 mm 时，隙宽增量达 0.125 mm，流量增量为 2.4 cm^3/s，引起该变化的原因是由于充填砂被剪胀导致的砂粒之间空间结构扰动。

此外，裂隙表面粗糙度与匹配程度共同决定了裂隙几何隙宽的大小[91]，裂隙的匹配程度越高，其

隙宽的几何分布越集中,裂隙隙宽沿流动方向变化小,减小了因壁面曲折或突缩、突扩结构引起的涡流区的形成,裂隙过流能力强。张劲松[24]利用算法生成不同匹配程度的三维粗糙裂隙并进行模拟试验,结果显示完全匹配裂隙与不完全匹配裂隙的非达西渗透系数 β 相差约 21.9,得出在相同条件下,裂隙的匹配程度越低,其内部流动表现出更强的非线性特征,渗透能力越弱。

3.1.2　孔隙结构影响

多孔介质内有效渗流通道由空间较宽阔的孔腔和较狭窄的孔喉组成(图 18)[92],如图 18 所示。在三维空间内,孔腔和与其相连的数条孔喉共同构成岩体孔隙的基本单元体,称为喉腔结(图 19)[93]。

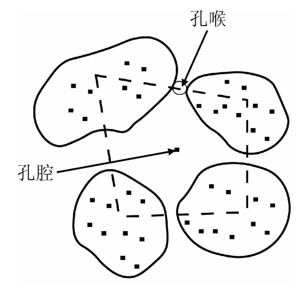


图 18　孔喉和孔腔的平面示意图[92]

Fig. 18　Plane diagram of pore throat and cavity[92]

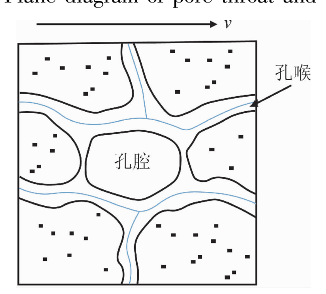


图 19　基本单元体喉腔结[93]

Fig. 19　Basic unit body-laryngeal lumen[93]

描述多孔介质渗透率的模型分为毛细管模型、确定性模型以及平均水力半径模型。毛细管模型未考虑喉道的迂曲度,高估了多孔介质的渗透率;确定性模型认为孔隙是周期性排列组成的无数变直径管道,与真实孔隙结构存在显著差异,因此计算结果可信度较低。平均水力半径模型认为孔喉分布无规律且呈弯管状,截面大小不一,但对孔喉结构的非均质性未加以描述[94]。而后,随着分形理论的提出,学者们将其融入模型中,以描述具有高度不规则性与非均质性的孔喉结构。有研究表明,分形维数越小,孔隙的连通性和均质性越好,孔喉粗糙度越低,渗流阻力越小[95]。除此之外,有学者基于毛细管模型,考虑毛细管的突缩突扩引起的局部水头损失与迂曲度的影响,建立分形孔喉模型,指出水力坡降是孔隙率、分形维数、孔喉比、流速、迂曲度维数等的函数,模型中各参数物理意义明确,与试验数据符合较好[94]。吴金随[96]建立了绕流阻力模型,考虑介质颗粒大小变化与分形维数对流动的影响,得到压降是流速、介质大小、孔隙率及分形维数的函数,验证了模型的合理性,但其不符合 FORCHHEIMER 方程。

迂曲度也将显著影响孔隙介质渗透性,定义为流体质点在穿越介质单位距离时,在孔喉中实际运动的长度,COLLINS[97]提出计算迂曲度公式同式(31)。通常,迂曲度是由试验方法[98]与数值模拟[99]确定,且多为与孔隙度的函数关系式。迂曲度越大说明孔隙介质内流道越弯曲,流体流动时阻力越大,渗透率越小。

随着学者们的深入研究,迂曲度在渗流过程中的作用不再单单只体现于孔隙度的变化,而与渗透率、颗粒形状级配、流动方向等息息相关。YUN 等[100]在理想几何模型的基础上考虑颗粒重叠、不重叠以及颗粒不同排列下的典型流线,取其几何平均与加权平均,建立了三维情况下球形颗粒、立方体颗粒、板状颗粒的迂曲度计算模型。吴金随等[101]以流体平均水力半径为基础揭示了迂曲度与孔隙率、颗粒平均粒径 D_p 与渗透率的函数关系,即

$$\tau = \sqrt{\frac{\varphi}{2k}}\frac{\varphi D_p}{6(1-\varphi)} \tag{32}$$

薛东杰等[102]推导出迂曲度分维确定的实验公式,并在满足质量守恒的前提下,推导出分叉孔隙通道的等效迂曲度数学表达式。裴雪皓等[103]建立各向异性动态渗透率模型,得出初始状态相同时,迂曲度决定着各方向渗透率变化的相对幅度大小,当迂曲度小于 1.6 时,岩石水平方向渗透率降幅高于垂向渗透率;迂曲度大于 1.6 时则相反。

颗粒形状是影响孔隙介质渗透性的另一重要参数,颗粒球形度、圆度、棱角性的不同会使颗粒间的接触关系、填充关系、密实程度、弯曲度、粒间摩擦等呈现不同的态势,影响孔隙渗流通道,进而造成水流运动状态的改变。

颗粒的球形度反映粒子长、宽、高之间的相似性,圆度为粒子表面的平均曲率半径[104]。1935 年,ZINGG[105]根据颗粒的长、中、短直径将卵石划分为圆盘、球形、叶状、杆状 4 类。BARREET[106]提出用形状、圆度和表面纹理来描述岩石颗粒。刘清秉

等[107]发现用整体轮廓系数、球形度和棱角度来描述砂粒形貌与剪胀角和临界状态摩擦角有良好的相关性。张家发等[108]自研制颗粒夹具,获取不同角度的颗粒投影,得出长宽比、球形度和扁平度对颗粒偏移球形的程度更为敏感,但其研究对象较为局限,评定参数的适用性还需进一步研究。

不少学者进行了相关的渗透试验来揭示颗粒形状对孔隙介质渗透性的影响。MAROT 等[109]发现颗粒的棱角度有助于增加渗流中的沿程阻力,致使渗透率下降。彭家奕等[110]对不规则形状碎石、球颗粒和八面体颗粒开展孔隙结构和渗透特性的对比研究发现,相同级配和密实度下,颗粒越接近球形,孔隙比表面积越小,越有利于形成串珠状连续孔隙系统,渗透性越强。康捷等[111]同样表明相同级配的砂样,砂粒球形度越高,砂样渗透系数越大。STEWART 等[112]对不同纵横比的椭球体进行渗流模拟,发现非球面颗粒周围的流线弯曲度较大,将导致比流量减少、渗透率降低。总体看来,骨架颗粒越趋向于球形,介质中的孔隙通道连通性越好,渗流过程中摩擦阻力降低,流速越大,细小颗粒对孔隙通道的堵塞作用易破坏,流体渗透性增强。

3.2 剪切作用影响

在荷载及水利工程施工的扰动下,裂隙岩体会沿结构面方向产生剪切行为,剪切作用将造成岩体变形,如剪切位移、剪缩、剪胀以及结构面的破坏[113]。发生剪切位移将使裂隙上下壁面错动,剪缩与剪胀效应造成裂隙隙宽的不均匀分布,结构面的破坏可能会造成岩屑的充填,进而影响裂隙内有效过流面积,使隙内流体的渗流特性发生改变。

岩体裂隙在剪切作用下发生剪胀或剪缩与上下壁面的咬合程度有关[114],如图 20 (a),完全咬合时当法向应力较小,无论剪应力方向如何都将产生剪胀;图 20 (c)中咬合程度最差时将产生剪缩,图 20 (b)中的剪胀效应与剪应力的作用方向有关,因此,剪切作用改变贴合状态时会发生剪胀,而改变离合状态时将发生剪缩。

ESAKI 等[115]总结试验数据,表示当剪应力接近峰值时将产生剪胀效应,裂隙张开度增大,剪胀变形与剪切位移呈正比关系增大。白正雄等[116]指出硬岩裂隙的剪胀及其演化与壁面的爬坡效应和粗糙凸起的磨损有关,随着剪切过程中剪胀的发挥,裂隙张开度将增加 1 个数量级以上,引起的渗透特性变化增幅将达 2 个数量级。CAO 等[117]提出剪切后的机械隙宽表达式 $e_m = e_0 - u_n + \Delta u_n$(其中 e_0 为初始隙宽,u_n 为减缩引起的隙宽减小值,Δu_n 为剪胀作用导致的隙宽增大值),如图 21 所示。

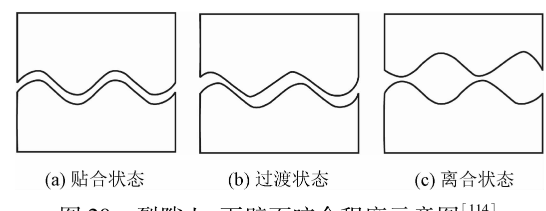


图 20 裂隙上、下壁面咬合程度示意图[114]

Fig. 20 Schematic diagram of the occlusal degree of the upper and lower walls of fracture[114]

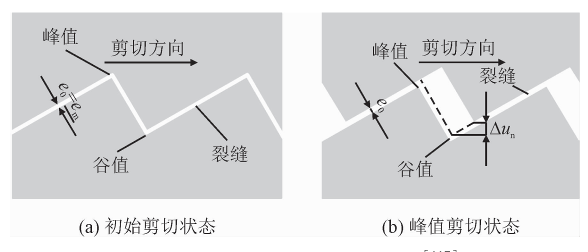


图 21 裂隙隙宽分布示意图[117]

Fig. 21 Schematic diagram of aperture distribution[117]

LIU 等[118]分析了整个剪切过程中三维粗糙裂隙的几何及水力特性演变规律,得出流体流动的各向异性在剪切位移较小时更加显著,垂直于剪切方向的渗透系数总是大于平行于剪切方向的渗透系数。赵延林等[119]表示节理水力隙宽变化受剪胀效应和法向闭合效应耦合作用,以偏应力系数 $k_m = 3$ ($k_m = \sigma_y / \sigma_x$)为界限,$k_m < 3$ 时,岩体节理被整体压缩闭合,水力隙宽分布较均匀;$k_m = 3$ 时,节理隙宽闭合量最小;$k_m > 3$ 时,已发生剪切破坏的节理开始剪胀,水力隙宽增加,而未屈服的节理在法向应力的作用下继续法向闭合,水力隙宽减小,使整体域内节理的水力隙宽分布极不均匀,并且节理剪胀效应将使 k_y 增加一个数量级,使 k_x 增加 3.6 倍。

同时,在剪切作用下,节理岩壁间的剪切错动造成表面粗糙凸起的磨损与破坏,应力越大,破坏程度越高,这些岩体碎屑随剪切位移充填于节理内部,其堆积形式与位置不断变化,影响隙宽分布及渗流特性[120]。曹成等[113]进行规则齿与光滑平面的剪切试验,一定渗流压力下不同法向应力的试件破坏结果见图 22 ,规则齿均被破坏,产生的碎屑填充物布于裂隙中,其剪切强度呈现明显的初始峰值阶段、中间软化阶段与峰后残余阶段,法向位移增量也呈现剪缩、剪胀与平缓阶段。以 FORCHHEIMER 公式对剪切过程中压力梯度与流量的关系进行拟合,研究

结果显示,随着剪切位移增加,线性项系数和非线性项系数均呈下降趋势,但临界雷诺数随剪切作用而不断增大,处于 7.238 ~ 82.730 之间,这表示水流转换为非线性流态的临界点不断上升。

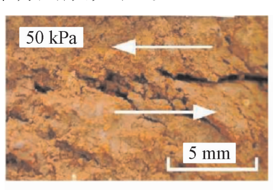


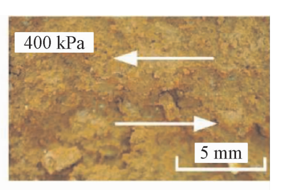

(a) 上试件破坏情况　　(b) 下试件破坏情况

图 22　规则齿裂隙面剪切破坏试验结果[113]

Fig. 22　Shear failure test results of regular tooth fracture surface[113]

在砂样、黏土体、土石混合体等多孔介质中,剪切作用同样会引起孔隙的时变,产生剪胀、剪缩以及剪切破坏,改变介质的渗透特性。胡黎明等[121]利用改进直剪仪探究砂与结构物接触面剪切特性,试验结果表明,接触面相对粗糙度大于 0.1 时,剪切破坏导致接触面附近薄层土体产生局部应变,形成剪切带,通过砂的平移和传动,剪切应力得以传递,砂的空间位置变化引起了剪切带内土体的剪胀现象。吴梦喜等[122]人工制备钙质砂样,进行砂与钢板的接触面剪切试验,钙质砂剪缩性大,在单调剪切条件下,正应力越大,砂样剪缩变形越大,正应力较小时甚至发生剪胀变形;在限制砂样压缩变形条件下,界面的正应力因钙质砂的剪缩性而显著降低,也导致了界面剪切强度的降低。王刚等[123]对压实黏土开展剪切-渗流试验,图 23 为黏土两种竖向压力下的剪切横断面放大图。





(a) 竖向压力为50 kPa　　(b) 竖向压力为400 kPa

图 23　相同压实度黏土在不同竖向压力下剪切后的断面图[123]

Fig. 23　Profile of the same compacted clay shear under different vertical pressures[123]

可以看出:低竖向压力下,剪切带内土体破碎为块体,块体相互错动爬升形成较大孔隙,产生集中渗漏通道,渗透系数急剧增大;在高竖向压力下,土体因发生剪缩被紧密压实,形成密合的挤压滑动面,其渗透特性并未有明显改变。

3.3　渗流压力影响

高坝高水头电站岩基及高压引水系统围岩常面临较高的渗流压力,岩体内裂隙在高渗压条件下力学行为将发生改变,如裂隙尖端应力集中产生开裂,节理面附近可能有新生裂纹萌生与扩展,影响裂隙岩体的渗透特性与稳定性,进一步诱发力学行为与渗透力学行为不断的耦合作用。

在高水压条件下,裂隙岩体中水流一般为紊流,符合非线性渗流规律,渗透系数变化明显。蔡海荣等[124]发现压水试验曲线呈扩张型,表明该裂隙岩体在渗压作用下原有裂隙加宽,隐裂隙劈裂,裂隙连通性增强导致渗透性增大;当曲线呈充填型时,表明裂隙在试验过程中被充填,连通性及胶结程度一般,渗透性较小;当曲线呈冲蚀型时,裂隙扩张、渗流量增大且无法恢复原状,隐裂隙与原裂隙进一步贯通,裂隙内的充填物易被冲蚀。黄勇等[125]开展裂隙水压力和围压对裂隙渗透系数的影响试验,表明裂隙渗透系数随裂隙水压增大呈线性增加趋势,随净围压增加呈指数下降的变化趋势。林志南等[126]进行单裂隙砂岩渗透试验,发现当水力梯度超过 22 MPa 时,随着水压的增加,单裂隙渗流行为将由线性逐渐过渡至非线性;当渗透水压高于 22 MPa 时,此时单裂隙凹槽中形成涡流,裂隙面持续冲蚀,内部渗流通道扩大,使游离松散颗粒被带出发生渗透失稳。

当渗透水压作用于土体时,水的流动会裹胁着细小颗粒克服颗粒间摩擦力或黏聚力而在土体的孔道或粗颗粒间的孔隙内运移,即发生渗蚀。渗蚀过程会影响土体的结构、粒径分布与孔隙率的大小,甚至造成土体侵蚀破坏,工程的安全稳定受到威胁。

STERPI[127]通过试验数据推导出侵蚀颗粒质量与时间和水力梯度的函数关系。MOFFAT 等[128]对 4 组不同级配的无黏性土采用多级渗透水压加载,试验表明级配均匀的细砂渗流过程中没有颗粒损失,渗透率为 1.5×10^{-2} cm/s;均匀级配的粗细砂试样在水力梯度为 5.1 时可以观察到细砂进入粗砂形成的孔隙中,当水力梯度增大至 9.4 时,发生渗蚀破坏;间隙级配试样在水力梯度为 10.6 时即发生渗蚀破坏。WANG 等[129]开展砾石土渗蚀试验,表明渗蚀将引起土体渗透系数变化,且启动水力梯度随细颗粒含量的增加而增大。魏海江等[50]基于 NMR 无损监测技术,分析了逐级增加水力梯度时不同细粒占比的无黏性土内部结构变化与颗粒流失的时变效

应,将渗蚀过程划分为颗粒迅速迁移的发展阶段、颗粒缓慢流失的缓蚀阶段和颗粒流失率接近零的平衡阶段。杨忠平等[130]基于不同含石率土石混合体侵蚀试验也发现了相同的渗蚀过程。LIANG 等[131]进行不同压实度下的渗蚀试验,定义了渗蚀发生和渗蚀贯通的临界水力梯度值,并指出增大土料的压实度,将提高土料渗蚀的启动水力梯度,减小土料的侵蚀程度。

4 渗流模型的修正

4.1 立方定律的修正

达西定律扩展应用至裂隙介质渗流问题后,根据裂隙介质几何特征,学者们简化裂隙表面与几何形态,提出光滑平行板模型,假设裂隙是两片光滑、平直、无限长的平行板构成,且流体为不可压缩的层流。现有研究已推导出经典的立方定律,表达为通过单一裂隙面的单宽流量与隙宽的三次方成正比,即

$$q = \frac{ge^3}{12\upsilon}J \tag{33}$$

式中:q 为通过光滑平行板的流量;e 为裂隙开度;J 为沿平行板方向的水力坡降;υ 为水的运动黏滞系数。

然而实际中的裂隙渗流行为很难满足立方定律的假设,裂隙的粗糙度、开度、曲折度等具有随机性,仍沿用将过高的估计通过裂隙的渗流量。许多学者针对粗糙裂隙的不同几何特性提出了立方定律的修正公式。王媛等[132]将其归纳为裂隙面粗糙性修正系数修正法、隙宽密度分布函数修正法、隙宽函数直接修正法、粗糙度修正法与面积接触率修正法五大类。本研究将基于以下几点对修正立方定律展开述评。

1)基于裂隙面起伏高差修正立方定律

LOMIZE 等[133]和 LOUIS 等[134]进行仿天然裂隙的试验研究,以突起高度 Δ 表征裂隙面的粗糙程度,提出层流下的岩体裂隙过水能力计算式,即

$$q = \frac{ge^3}{12\upsilon}J\frac{1}{1 + n\left(\frac{\Delta}{e}\right)^{1.5}} \tag{34}$$

式中:n 为经验系数,LOMIZE 公式中 n 取值为 6;LOUIS 公式中 n 取值约为 3.11。

修正公式(34)成立的假设条件为裂隙表面突起高度在整个裂隙面内均匀分布,突起高度起伏较大的裂隙面是否适用还有待考究。

速宝玉等[47]将层流看作是一种非线性程度极弱的流态,用人工加粗方法模拟裂隙壁面粗糙度,全壁面用千分尺测量得绝对粗糙度 Δ,试验数据分析拟合得式(35),考虑了流态由层流至紊流的渐变过程,该修正公式可统一描述层流与紊流状态下的粗糙裂隙渗流规律。

$$q = \frac{ge^3}{12\upsilon}J^m\frac{1}{1 + 1.2\left(\frac{\Delta}{e}\right)^{-0.75}} \tag{35}$$

式中:m 为裂隙水流非线性指数,且 $m = 1.0 - 0.5e^{-2.31\frac{\Delta}{e}}$。

王志良等[135]分段随机生成裂隙长和裂隙宽的粗糙面,基于 LBM 法进行数值模拟,模拟中裂隙渗流均处于层流状态,拟合数据得粗糙裂隙渗流的立方定律修正公式,即

$$q = \frac{ge^3}{12\upsilon}J\frac{1}{1 + 46.9462\left(\frac{\Delta}{e}\right)^{1.2305}} \tag{36}$$

该修正公式在裂隙渗流面一侧光滑、一侧粗糙的前提下推导得出,对两侧均粗糙的裂隙面渗流情况下的适用性应进一步验证。

预制浇筑的多孔混凝土粗糙面多呈下凹分布,甘磊等[136]以多孔混凝土下凹裂隙面为研究对象,发现其与现有上凸形态裂隙面的过流能力规律完全相反,因此将裂隙面的粗糙程度以裂隙面下凹度 χ 来表征,并修正立方定律。χ 的计算式为

$$\chi = 0.075a_1 + 0.300b_1 + 0.600c_1 + 0.875d_1 \tag{37}$$

式中:a_1、b_1、c_1、d_1 为等效均质后各下凹程度区域面积百分占比。

通过试验验证,得出裂隙单宽流量与裂隙开度和下凹度正相关,引入相对下凹度 $\chi' = \chi/e$,拟合得基于 χ' 的立方定律修正式为

$$q = \frac{ge^3}{12\upsilon}J \times \left\{9.8179e^{1.855}\left(\frac{\chi}{e}\right)^2 + (-2.8662e + 0.5963)\left(\frac{\chi}{e}\right) + 1.0\right\} \tag{38}$$

该修正公式可广泛应用于处于下凹形态的光滑或粗糙裂隙面,为涉水混凝土建筑物内部细小裂隙的渗流量估算提供理论基础,但因考虑因素较少存在一定的局限性。

总体看来,基于裂隙面起伏高差修正的立方定

律均可表达为 $q=\omega \dfrac{ge^3}{12\upsilon}J$,$\omega$ 为修正系数,且其大多在流态为层流时拟合较好,但适用范围比较局限。

2)基于开度修正立方定律

NEUZIL 等[137]考虑起伏裂缝壁面造成的开度不均,假设开度分布形式为对数正态分布,提出以开度密度分布函数修正的立方定律。

$$q = \frac{\gamma L}{12\upsilon}J\int_0^\infty e^3 f(e)\mathrm{d}e \tag{39}$$

TSANG 等[138]将 NEUZIL 所提公式推广至二维裂隙面,用隙宽函数直接对立方定律进行修正。

$$q = w\frac{\gamma J}{12\upsilon}(d^3)_x^{1/3}\frac{1}{(1/d^2)_y} \tag{40}$$

式中:$(d^3)_x$ 为 x 方向上开度三次方的平均值;$(1/d^2)_y$ 为 y 方向开度负二次方的平均值。

式(39)~(40)将裂隙开度的分布不均纳入考虑因素,但要探测并获得裂隙面的开度分布函数存在困难,计算难度大,因此在应用中还受到极大限制。

何冠鸿[139]在推导二维粗糙裂隙层流的修正公式时,引入裂隙壁面起伏角的平均值对开度进行修正,见式(41)。

$$q = \frac{\gamma e^3}{12\upsilon}J\frac{1}{\cos^{-4}\alpha} \tag{41}$$

式中,$\cos^{-4}\alpha$ 为起伏角 α 余弦值负四次方的平均值。

该公式中参数 α 可便捷获取,修正公式应用方便,但不适用于过渡流及紊流情况。何冠鸿[139]分析数值模拟结果提出雷诺数大于 10 时的过渡流流态修正公式,即

$$q = \frac{\gamma e^3}{12\upsilon}J\frac{\cos^4\alpha}{1+0.01295\delta\left(\dfrac{Jge^3}{12\upsilon^2}\right)^{0.7901}} \tag{42}$$

式(42)成立的条件为 $Re=10\sim2\,000$,在层流状态下可退化至式(41)。过渡流流态中既含有层流又含有紊流,紊流在局部区域形成水力漩涡,加大边壁对流体的摩擦阻力,此时,过流能力便与边壁的偏转角 δ 直接相关。

卢占国等[140]对不同开度下的平行裂缝进行单相渗流实验,得到适用于粗糙平行裂缝的修正立方定律,即

$$q = \frac{ne^3 l}{12\upsilon}J\frac{1}{1+2.792\left(\dfrac{\Delta}{e}\right)^{-0.027}} \tag{43}$$

式中:n 为裂缝条数;l 为裂缝长度。

张帅领等[141]基于实际中广泛存在的矩形狭缝裂隙,考虑裂隙宽度 w 及宽度与开度比值(w/e)的影响,开展数值模拟,以极限流速及极限雷诺数为衡量标准确定立方定律的适用范围,表明裂隙宽度越大、开度越小,立方定律越适用,并提出修正立方定律式(44)。

$$h_f = \left(\frac{12\upsilon}{\rho g}\right)Lv\left[\frac{1}{e^2}+\frac{1}{w^2}+\left(\frac{w}{e}\right)^n\frac{1}{\max(e,w)^2}\right] \tag{44}$$

式中,h_f 为水头损失量,且 $h_f=JL$。

3)基于曲折度修正

曲折度是实际渗流长度与表观长度的比值,裂缝内的弯曲程度可以通过微观尺度与裂缝长度尺度来表征。微观尺度指在一个小区间内由裂缝壁的起伏所造成的流线弯曲,裂缝长度尺度的弯曲效应是微观尺度的叠加,表现在整个流场内流线沿流路变化的弯曲,将会影响裂隙的过流能力,此时基本立方定律不再适用。

GE 等[82]首先提出基于曲折度修正的渗流控制方程。

$$\frac{\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}d_{\mathrm{m}}^3}{12\upsilon Q_x} = \left[1+\left(\frac{2\pi d_{\mathrm{m}}\delta}{\lambda}\right)^2\cos^2\frac{2\pi x}{\lambda}\right]^{3/2} \tag{45}$$

式中:d_{m} 为平均隙宽;δ 为隙宽变化幅度系数;λ 为隙宽变化波长。

XIAO 等[85]考虑粗糙度和曲折度的综合影响,建立半经验方程,由试验数据及数值分析结果验证了其在预测粗糙裂隙过流能力时的有效性。

$$q = \frac{we^3}{12\upsilon}\nabla p\frac{1}{\tau^2 T_{\mathrm{s}}^2\left[1+5.0\left(\dfrac{\Delta}{2e}\right)^{1.5}\right]} \tag{46}$$

式中,T_{s} 为表面弯曲系数。

潘汝江等[142]建立不同线曲折度和面曲折度的粗糙单裂隙模型,通过数值模拟发现,随着粗糙度的增大,裂隙流线曲折,影响流体流动的边界层作用显著,裂隙流动时的局部损失增大,同时伴随着沿程阻力损失的增大。粗糙的裂隙壁使沿渗径方向的线曲折与垂直流动方向的面曲折共同造成了流动的非线性,因此提出了考虑线曲折度和面曲折度的修正模型。

$$q = \frac{\rho g e^3}{12\upsilon}J\frac{\tau_A}{\tau_1} = \frac{\rho g e^3}{12\upsilon}J\frac{A_t}{A_s}\frac{L}{L_0} \tag{47}$$

式中:τ_A 为平均面曲折度;τ_1 为裂隙线曲折度。

4)基于节理粗糙度系数 JRC 修正

BARTON[73]对不同粗糙度的十条典型节理轮廓

面进行抗剪强度实验反求出 JRC 指标,以 JRC 来描述天然裂隙的粗糙程度得到了国际岩石力学学会[143]及业内的一致认可。1985 年,BARTON 等[144]提出以 JRC 指标修正的立方定律公式。

$$q = \frac{g e_{m}^{6}}{12 v} J \frac{1}{\mathrm{JRC}^{7.5}} \tag{48}$$

式中,e_m为机械隙宽。

徐青等[145]在 BARTON 提出的 10 条典型 JRC 曲线的基础上,从工程实用角度出发,建立 JRC 裂隙数值模型,提出基于 JRC 指标的裂隙修正系数公式,该式可用于裂隙岩体渗透特性的快速估算。

$$q = \frac{g e^{3}}{12 v} J[-0.01(\mathrm{JRC})+1] \tag{49}$$

5)多参数耦合修正

张戈等[146]采用 LBM 法模拟单裂隙渗流,将相对粗糙度与迂曲度引入立方定律修正考虑因素,修正模型预测效果比单一因素更好,这是因为迂曲作用影响流场内局部压力梯度,粗糙作用使局部流态改变,引入迂曲作用会弱化部分粗糙作用,对流量的预测更加准确。

$$q = \frac{e^{3}}{12 \tau v} J \frac{1}{1+0.61308\left(\frac{\Delta}{e}\right)^{0.60912}} \tag{50}$$

徐青等[145]将裂隙开度 e、凸起高度 Δ、起伏角 α、曲折度 τ 纳入修正的考虑因素,建立上下匹配规则的锯齿状裂隙模型,通过数值模拟试验发现,修正公式(51)适用于任意天然不规则裂隙,且精度较高。

$$q = \frac{g e^{3}}{12 v} J\left[\left(1-\frac{\cos^{3} \alpha}{\tau}\right) \exp \left(-\frac{\Delta}{e} \frac{180}{\alpha}\right)+\frac{\cos^{3} \alpha}{\tau}\right] \tag{51}$$

4.2 FORCHHEIMER 公式的修正

多孔介质及裂隙中的非达西渗流规律可由 FORCHHEIMER 公式定性表述,见式(6)。由于 FORCHHEIMER 公式为拟合公式,式中的参数缺乏明确的求解,通过试验测定渗透率 k 及非达西渗流系数 β 费时费力,适用性差,因此学者们致力于分析式中参数的影响因素,建立合理的模型以对 FORCHHEIMER 公式进行修正,提高其在工程上的实用性。

1)孔隙介质修正

JANICEK 等[147]提出非达西渗透系数 β 与渗透率及孔隙率呈反比关系,并给出具体的计算关系式

$$\beta = \frac{1.82 \times 10^{8}}{k^{\frac{5}{8}} \varphi^{\frac{3}{4}}} \tag{52}$$

KUNDU 等[148]用球形玻璃珠来模拟多孔介质中的非线性渗流行为,拟合试验数据建立了与颗粒直径、孔隙率等参数有关的渗透率 k 及非达西渗流系数 β 计算模型。

$$k = \frac{D_{p}^{2}}{\Omega} \frac{\varphi^{3}}{(1-\varphi)^{2}},$$

$$\beta = \frac{\omega}{D_{p}} \frac{(1-\varphi)}{\varphi^{3}} \tag{53}$$

式中:D_p为颗粒直径;Ω、ω 为颗粒特征系数。

曹成[9]以破碎岩体为研究对象开展室内试验,揭示破碎岩体级配、孔隙率和水力梯度对其非达西渗流系数和非达西等效渗透系数取值的影响机理,并建立计算模型,修正了 FORCHHEIMER 定律。通过分析试验数据,发现不同孔隙率及级配条件下水流流态均偏离达西定律,且线性项系数和非线性项系数均随孔隙率及 Talbot 系数的增大而减小,并且变化幅度较大。此外,渗透率仅受线性项系数的影响,与 A 成反比。非达西渗流系数仅受非线性项系数的影响,与 B 成正比。基于此,建立渗透率和非达西渗流系数与孔隙率和级配之间的回归模型,分析求解得具体表达式见式(54)。

$$k = \mathrm{e}^{14.91 \varphi-29.54} \cdot \eta^{0.237},$$

$$\beta = \frac{\mathrm{e}^{13.894-0.085 \eta}}{\varphi^{0.508}} \tag{54}$$

将式(54)代入式(6)、(7)中,即可求解 FORCHHEIMER 定律中的线性项系数 A 及非线性项系数 B,对 FORCHHEIMER 公式进行修正。

2)裂隙介质修正

有研究表明,裂隙在走向和倾向方向上空间长度近似相等[149]。王明玉等[150]采用与实际裂隙形态相近的圆盘状建立单圆盘裂隙模型,开展岩体不同隙宽和交线长度下的渗流试验,并基于试验数据对 FORCHHEIMER 定律修正如下。

$$A = 10^{9.14} e^{-2.016} w^{-1.498}, B = 10^{17.006} e^{-0.918} w^{-4.542} \tag{55}$$

虽然式(55)对试验数据拟合程度较好,但其仅可刻画直径接近 50 cm 的圆盘模型,对其他半径下的模型还需对参数进一步修正。

林志南等[126]探究了不同 JRC 条件下渗流参数随水力梯度的演化规律,结果表明,应用 FORCHHEIMER 公式拟合时,非达西惯性系数为负值,其方程

参数 A 和 B 与 JRC 的定量关系可表示为

$$A = 0.019 \times \mathrm{JRC}^2 - 0.255 \times \mathrm{JRC} + 2.465,$$
$$B = \frac{0.27}{1 - \exp\left(\frac{\mathrm{JRC} - 13}{0.38}\right)} \tag{56}$$

NI 等[151]自研制可变粗糙度与孔径的渗流装置,3D 打印出粗糙裂隙渗流面进行渗流试验,基于试验数据推导出考虑裂隙开度与粗糙度的半经验修正方程(57)。

$$q = \frac{\eta}{\mathrm{JRC}^{\varepsilon}} J^f,$$
$$\beta = \frac{0.042\mathrm{JRC}}{e} \tag{57}$$

式中:η 、ε 、f 均为经验系数,其中 $\eta = 3.209\,875 \sim 3.132\,625$, $\varepsilon = 0.305\,18 \sim 0.380\,66$, $f = 0.60 \sim 0.68$。

CHEN 等[152]基于不同围压下的粗糙裂隙渗流试验,对非线性系数 B 进行修正,一个为水力隙宽的幂函数,一个为水力隙宽与粗糙度的函数,具体表达式为

$$B = \lambda {e_{\mathrm{h}}}^{-m} \tag{58}$$
$$B = \frac{a_0}{2^{b_0}} \frac{\rho \xi^{b_0}}{w^2 {e_{\mathrm{h}}}^{b_0 + 3}} \tag{59}$$

式中:λ 和 m 为回归系数;a_0、b_0 为无因次系数;ξ 为粗糙壁面高度。

由以上修正公式可以看出,在非达西渗流模型中考虑隙宽与裂隙壁面粗糙度的影响将更加贴合实测数据,且有助于理解非线性渗流的形成机理。

4.3　达西定律的修正

达西定律形式简单,物理意义明确,是进行渗流分析的基础理论,但其在描述流体处于低速和高速非达西渗流过程时因超出其适用范围而偏差较大,若仍沿用则需针对非达西流态对达西定律进行适当修正。邹信方等[153]提出低流速下用启动压力梯度值来修正达西定律,基于多孔介质流动试验所得数据,发现启动压力梯度值将随介质流动性 k/μ 的升高而降低,并得出低流动性下达西定律的校正方程式(60),但文中仅使用了 3 种不同材料的多孔介质和盐水,因此还需对此进一步研究探讨。

$$u = -\frac{k}{\mu}(J - J_0 + \rho g \sin\theta) \tag{60}$$

曹成[9]以破碎岩体非达西渗流试验为基础,融入微元法思想,将压力梯度和渗流量之间的 FORCHHEIMER 非线性关系曲线划分为无限多直线段,每个直线段的斜率即为渗透系数相关函数,其值随压力梯度增大而逐渐减小,此外,通过改变介质渗透系数的方法可以使达西定律满足分段后的非达西渗流,定义非达西等效渗透系数 $K_{\text{n-d}}$ 来描述非达西流态下介质的渗透系数,基于此建立相应的修正模型以完善达西定律,修正关系为

$$K_{\text{n-d}} = c\mathrm{e}^{fJ},$$
$$c = \mathrm{e}^{-7.186} \varphi_{\mathrm{s}}^{1.769} \eta^{0.075},$$
$$f = -\mathrm{e}^{-5.486} \varphi_{\mathrm{s}}^{1.949} \eta^{0.057} \tag{61}$$

式中:$K_{\text{n-d}}$ 为非达西等效渗透系数;φ_{s} 为孔隙率;η 为 Talbot 系数。

修正后的关系式保留了达西定律的数学形式,在小水力梯度作用下将退化为达西渗流模型,渗流计算时无须进行流态的判别即可获得较精确的求解。

5　总结与展望

岩土体中常出现非达西渗流,并且机理复杂渗流过程难以预测,如何揭示岩土体非达西渗流特性是目前学者们研究的重点。结论如下。

1)非达西渗流包括低速非达西渗流和高速非达西渗流,并且达西定律低估低速非达西渗流流速、高估高速非达西渗流流速。

2)渗流通道迂曲率越大、尺寸变化越显著、回流漩涡占比越大,岩土体过流能力越低,非达西渗流越显著。

3)剪切作用使渗流通道尺寸和连通性不断变化,剪胀效应将增强岩土体过流能力,使非达西渗流现象弱化。

4)高渗流压力导致水流惯性力作用显著,是导致高估高速非达西渗流的关键外因。

5)定量描述岩土体空隙结构和渗流压力对其非达西渗流特性的影响机制,是目前修正达西渗流模型的常用手段。

基于学者们围绕非达西渗流展开的全面研究,为水利工程、岩土工程、石油开采等领域提供了丰厚的理论基石和计算模型。工程上可以精准地评估含水层渗透性较差或地质条件复杂环境下的地下水运移规律;有效的求解坝体坝基及岩质边坡的渗流稳定参数,预防库区渗漏和滑坡灾害的发生;以最优开采策略获取产能更高的石油、天然气和地热等资源。但目前岩土体非达西渗流分析研究还受过程可视化

监测难、多场耦合求解精度低、不易构建大尺度多重介质渗流模型等方面掣肘,未来可从以下几个方面拓展研究。

1)岩土体渗透破坏过程中往往伴随着不同程度的颗粒流失,颗粒群的时空迁移过程对岩土体非达西渗流特性影响显著。

2)目前渗流试验多为“黑匣子”模式,无法观测岩土体内部的渗流过程,研制全域可视化渗流试验设备,可为非线性渗流分析研究提供科学的研究手段。

3)岩土体在工程环境下受到外部荷载、气候环境、物理化学侵蚀等作用的影响,因此揭示多场强耦合作用下岩土体非线性渗流特性具有一定的研究前景。

4)目前岩体裂隙研究以单裂隙或小尺度裂隙组合为主,构建大尺度多重介质非线性渗流模型对实际工程渗流分析极为重要。

参考文献:

[1] 蒋中明,肖喆臻,唐栋. 坝基岩体裂隙渗流效应数值模拟方法[J]. 水利学报,2020,51(10):1289-1298.
JIANG Zhongming, XIAO Zhezhen, TANG Dong. Numerical analysis method of fluid flow in fractured rock mass of dam foundation [J]. Journal of hydraulic engineering, 2020, 51 (10): 1289-1298 (in Chinese).

[2] ELSANOOSE A, ABOBAKER E, KHAN F, et al. Estimating of non-darcy flow coefficient in artificial porous media[J]. Energies, 2022, 15(3): 1197.

[3] 许增光,曹成,柴军瑞,等. 断层带破碎岩体非达西渗流特性及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(增刊2):4099-4108.
XU Zengguang, CAO Cheng, CHAI Junrui, et al. Study on non-Darcy seepage characteristic and model of the broken rock mass of fault zone[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023, 42(S2): 4099-4108 (in Chinese).

[4] HUANG T, DU P B, PENG X K, et al. Pressure drop and fractal non-Darcy coefficient model for fluid flow through porous media [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2020, 184: 106579.

[5] XING K, QIAN J Z, MA H C, et al. Characterizing the relationship between non-Darcy effect and hydraulic aperture in rough single fractures [J]. Water resources research, 2021, 57 (9): e2021WR030451.

[6] 张丙强,王启云,臧万军. 非达西渗流效应对深埋圆形隧洞弹塑性解的影响[J]. 铁道学报,2018,40(8):139-145.
ZHANG Bingqiang, WANG Qiyun, ZANG Wanjun. Influence of non-Darcy seepage effect on elastoplastic solution of a deep-buried circular opening[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 139-145 (in Chinese).

[7] BASAK P. Non-Darcy flow and its implications to seepage problems [J]. Journal of the irrigation and drainage division, 1977, 103(4): 459-473.

[8] SONI J P, ISLAM N, BASAK P. An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media[J]. Journal of hydrology, 1978, 38 (3/4): 231-241.

[9] 曹成. 地下洞室群渗流场精细化模拟及演化规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.

[10] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[11] 秦峰,王媛. 非达西渗流研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2009,31(3):25-29.
QIN Feng, WANG Yuan. Research advance of non-Darcy flow[J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2009, 31(3): 25-29 (in Chinese).

[12] 巴斯宁耶夫 K C,费拉索夫 A M,科钦纳 N H,等. 地下流体力学[M]. 张永一,赵碧华,译. 北京:石油工业出版社,1992.

[13] 王福刚,管小桐,何庆成,等. 考虑边界层流体黏度变化的黏性土低速非达西渗流数学模型[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版). (2024-03-07)[2024-03-15]. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230299.
WANG Fugang, GUAN Xiaotong, HE Qingcheng, et al. A mathematical model of low-speed non-Darcy seepage in viscous soil considering the change of boundary layer fluid viscosity[J/OL]. Journal of jilin university (earth science edition). (2024-03-07) [2024-03-15]. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230299 (in Chinese).

[14] 葛家理,宁正福,刘月田,等. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,2001.

[15] 徐维生,柴军瑞,王如宾,等. 低渗透介质非达西渗流研究进展[J]. 勘察科学技术,2007(3):20-24.
XU Weisheng, CHAI Junrui, WANG Rubin, et al. Progress on study of non-Darcy seepage in low permeability media[J]. Site investigation science and technology, 2007(3): 20-24 (in Chinese).

[16] 陈舟,钱家忠,姜常让,等. 多孔介质地下水非达西渗流研究进展[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(10):1539-1543.
CHEN Zhou, QIAN Jiazhong, JIANG Changrang, et al. Review of non-Darcy seepage of groundwater in porous media[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2008, 31 (10): 1539-1543 (in Chinese).

[17] BEAR J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生,陈崇希,译. 北京:中国建筑工业出版社,1983.

[18] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998.

[19] 姚约东,葛家理. 石油非达西渗流的新模式[J]. 石油钻采工艺,2003,25(5):40-42.
YAO Yuedong, GE Jiali. New pattern and its rules of oil non-Darcy flow in porous media[J]. Oil drilling & production technology, 2003, 25(5): 40-42 (in Chinese).

[20] CHEN Z X,LYONS S L,QIN G. Derivation of the forchheimer law via homogenization[J]. Transport in porous media,2001,44(2):325-335.

[21] CHENG N S,HAO Z Y,TAN S K. Comparison of quadratic and power law for nonlinear flow through porous media[J]. Experimental thermal and fluid science,2008,32(8):1538-1547.

[22] ZOU L C,JING L R,CVETKOVIC V. Shear-enhanced nonlinear flow in rough-walled rock fractures[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2017,97:33-45.

[23] ZHANG Z Y. Hydromechanical behaviour and nonlinear flow characteristics of rock fractures[D]. Wollongong:University of Wollongong,2013.

[24] 张劲松. 三维粗糙单裂隙匹配特性及水-力耦合作用下渗流特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.

[25] 张文娟,王媛,倪小东. Forchheimer 型非达西渗流参数特征分析[J]. 水电能源科学,2014,32(1):52-54,164.
ZHANG Wenjuan,WANG Yuan,NI Xiaodong. Analysis of parameters characteristics of Forchheimer's non-Darcy seepage[J]. Water resources and power,2014,32(1):52-54,164(in Chinese).

[26] FORCHHEIMER P. Wasserbewegung durch boden[J]. Zeitschrift des Vereins Deutscherlngenieure,1901,45:1781-1788.

[27] 许凯,雷学文,孟庆山,等. 非达西渗流惯性系数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):164-170.
XU Kai,LEI Xuewen,MENG Qingshan,et al. Study of inertial coefficient of non-darcy seepage flow[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2012,31(1):164-170(in Chinese).

[28] EL-ZEHAIRY A A,NEZHAD M M,JOEKAR-NIASAR V,et al. Pore-network modelling of non-Darcy flow through heterogeneous porous media[J]. Advances in water resources,2019,131:103378.

[29] MACINI P,MESINI E,VIOLA R. Laboratory measurements of non-Darcy flow coefficients in natural and artificial unconsolidated porous media[J]. Journal of petroleum science and engineering,2011,77(3/4):365-374.

[30] 李新东,樊贵盛. 黄河滩地砂卵石介质非达西渗流参数预测[J]. 灌溉排水学报,2016,35(1):94-98.
LI Xindong,FAN Guisheng. Predicting parameters of non-Darcy seepage flow about sandy pebble on Yellow River beach[J]. Journal of irrigation and drainage,2016,35(1):94-98(in Chinese).

[31] GEERTSMA J. Estimating the coefficient of inertial resistance in fluid flow through porous media[J]. Society of petroleum engineers journal,1974,14(5):445-450.

[32] 马亚楠,杨志兵,熊小锋,等. 粗糙裂隙各向异性对非达西渗流特性的影响[J]. 人民长江,2023,54(1):233-239.
MA Yanan,YANG Zhibing,XIONG Xiaofeng,et al. Influence of anisotropy on non-Darcian seepage flow behavior in rough fractures[J]. Yangtze River,2023,54(1):233-239(in Chinese).

[33] 黄先伍,唐平,缪协兴,等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1385-1388.
HUANG Xianwu,TANG Ping,MIAO Xiexing,et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone[J]. Rock and soil mechanics,2005,26(9):1385-1388(in Chinese).

[34] WATANABE H. Comment on Izbash's equation[J]. Journal of hydrology,1982,58(3/4):389-397.

[35] ZHANG Y,CHAI J R,CAO C,et al. Investigating Izbash's law on characterizing nonlinear flow in self-affine fractures[J]. Journal of petroleum science and engineering,2022,215,Part A:110603.

[36] RONG G,HOU D,YANG J,et al. Experimental study of flow characteristics in non-mated rock fractures considering 3D definition of fracture surfaces[J]. Engineering geology,2017,220:152-163.

[37] TZELEPIS V,MOUTSOPOULOS K N,PAPASPYROS J N E,et al. Experimental investigation of flow behavior in smooth and rough artificial fractures[J]. Journal of hydrology,2015,521:108-118.

[38] RONG G,YANG J,CHENG L,et al. Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics in rough fractures during shear process[J]. Journal of hydrology,2016,541,Part B:1385-1394.

[39] XING K,MA L,QIAN J Z,et al. Experimental and numerical study on the Izbash equation coefficients in rough single fractures[J]. Physics of fluids,2023,35(12):126603.

[40] QIAN X,XIA C C,GUI Y. Quantitative estimates of non-Darcy groundwater flow properties and normalized hydraulic aperture through discrete open rough-walled joints[J]. International journal of geomechanics,2018,18(9):04018099.

[41] 毛迪凡. 孔隙介质渗流基本方程的改进[D]. 武汉:中国地质大学,2012.

[42] 李文亮,周佳庆,贺香兰,等. 不同围压下破碎花岗岩非线性渗流特性试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(增刊1):140-150.
LI Wenliang,ZHOU Jiaqing,HE Xianglan,et al. Nonlinear flow characteristics of broken granite subjected to confining pressures[J]. Rock and soil mechanics,2017,38(S1):140-150(in Chinese).

[43] GEORGE G H,HANSEN D. Conversion between quadratic and power law for non - Darcy flow[J]. Journal of hydraulic engineering,1992,118(5):792-797.

[44] PARKIN A K. Field solutions for turbulent seepage flow[J]. Journal of the soil mechanics and foundations division,1971,97(1):209-218.

[45] 甘馥硕. 流态演变与流体性质对岩石裂隙非线性渗流影响机制研究[D]. 武汉:中国地质大学,2023.

[46] 王帅,于庆磊,王玲. 单轴压缩条件下裂隙粗糙度对渗透系数的影响[J]. 工程科学学报,2021,43(7):915-924.
WANG Shuai,YU Qinglei,WANG Ling. Effect of fracture roughness on permeability coefficient under uniaxial compression[J]. Chinese journal of engineering,2021,43(7):915-924(in Chinese).

[47] 速宝玉,詹美礼,赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):19-24.
SU Baoyu,ZHAN Meili,ZHAO Jian. Study on fracture seepage in the imitative nature roke[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,1995,17(5):19-24(in Chinese).

[48] 杨斌,徐曾和,杨天鸿,等. 高水力梯度条件下颗粒堆积型多孔介质渗流规律试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(11):4017-

4024.
YANG Bin,XU Zenghe,YANG Tianhong,et al. Experimental study of non-linear water flow through unconsolidated porous media under condition of high hydraulic gradient[J]. Rock and soil mechanics, 2018,39(11):4017-4024(in Chinese).

[49] 史海明. 颗粒堆积多孔介质渗流特性的研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.

[50] 魏海江,许增光,耿凯强,等. 渗蚀过程中孔结构参数对细颗粒流失的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(4):417-424.
WEI Haijiang,XU Zengguang,GENG Kaiqiang,et al. Effect of pore structure parameters on loss of fine grain during suffusion[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2023,41(4): 417-424(in Chinese).

[51] 仵彦卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.

[52] ZHOU C B,SHARMA R S,CHEN Y F,et al. Flow-stress coupled permeability tensor for fractured rock masses[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2008,32(11):1289-1309.

[53] MA W L,XU Z G,CHAI J R,et al. Estimation of Rev size of 2-D DFN models in nonlinear flow:considering the fracture length-aperture correlation[J]. Computers and geotechnics, 2023, 161: 105601.

[54] LI X X,LIU J S,GONG W P,et al. A discrete fracture network based modeling scheme for analyzing the stability of highly fractured rock slope[J]. Computers and geotechnics, 2022, 141: 104558.

[55] WARREN J E,ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of petroleum engineers journal,1963,3(3): 245-255.

[56] 仵彦卿. 岩体水力学基础(六)--岩体渗流场与应力场耦合的双重介质模型[J]. 水文地质工程地质,1998,25(1):43-46.
WU Yanqing. Principles of rock mass hydraulics(6):dual medium model of coupling seepage field and stress field in rock mass[J]. Hydrogeology & engineering geology,1998,25(1):43-46(in Chinese).

[57] 胡黎明,林丹彤,张鹏伟,等. 多孔介质孔隙结构模型及其在渗流分析中的应用[J]. 太原理工大学学报,2022,53(3):360-370.
HU Liming, LIN Dantong, ZHANG Pengwei, et al. Pore structure model for porous media and application in seepage analysis[J]. Journal of taiyuan university of technology,2022,53(3):360-370 (in Chinese).

[58] MAHMOODLU M G,RAOOF A,SWEIJEN T,et al. Effects of sand compaction and mixing on pore structure and the unsaturated soil hydraulic properties[J]. Vadose Zone journal,2016,15(8):1-11.

[59] 闫国亮,孙建孟,刘学锋,等. 过程模拟法重建三维数字岩芯的准确性评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(2):71-76.
YAN Guoliang,SUN Jianmeng,LIU Xuefeng,et al. Accuracy evaluation on 3D digital cores reconstruction by process-based method [J]. Journal of southwest petroleum university(science & technology edition),2013,35(2):71-76(in Chinese).

[60] SANEMATSU P C,THOMPSON K E,WILLSON C S. Pore-scale modeling of nanoparticle transport and retention in real porous materials[J]. Computers & geosciences,2019,127:65-74.

[61] RAMSTAD T,BERG C F,THOMPSON K. Pore-scale simulations of single- and two-phase flow in porous media:approaches and applications[J]. Transport in porous media,2019,130(1):77-104.

[62] BRYANT S L,KING P R,MELLOR D W. Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing[J]. Transport in porous media,1993,11(1):53-70.

[63] AL-RAOUSH R I,WILLSON C S. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems [J]. Journal of hydrology,2005,300(1/2/3/4):44-64.

[64] SINGH M,MOHANTY K K. Dynamic modeling of drainage through three-dimensional porous materials[J]. Chemical engineering science,2003,58(1):1-18.

[65] GAO S Y,MEEGODA J N,HU L M. Two methods for pore network of porous media[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics,2012,36(18):1954-1970.

[66] 谭彩,潘展钊,袁明道,等. 基于计算机断层扫描的浆砌石真实三维孔隙网络模型及其渗流数值模拟[J]. 水电能源科学,2024,42(2):89-93.
TAN Cai,PAN Zhanzhao,YUAN Mingdao,et al. Realistic 3D pore network model of slurry masonry and numerical simulation of seepage based on CT technology[J]. Water resources and power,2024,42(2):89-93(in Chinese).

[67] JERAULD G R,SALTER S J. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore-level modeling[J]. Transport in porous media,1990,5(2):103-151.

[68] 张兴昊,林丹彤,胡黎明. 基于等效孔隙网络模型的水动力弥散数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(12): 1906-1914.
ZHANG Xinghao,LIN Dantong,HU Liming. Numerical simulations of hydrodynamic dispersion based on an equivalent pore network model[J]. Journal of Tsinghua University(science and technology),2022,62(12):1906-1914(in Chinese).

[69] 朱红光,易成,谢和平,等. 基于立方定律的岩体裂隙非线性流动几何模型[J]. 煤炭学报,2016,41(4):822-828.
ZHU Hongguang, YI Cheng, XIE Heping, et al. A new geometric model for non-linear flow in rough-walled fractures based on the cubic law[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(4):822-828 (in Chinese).

[70] 朱海军,周创兵. 岩土体三维非线性渗流有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3076-3080.
ZHU Haijun,ZHOU Chuangbing. 3D nonlinear seepage analysis for rock-soils with finite element method[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(18): 3076-3080(in Chinese).

[71] 熊峰,姜清辉,陈胜云,等. 裂隙-孔隙双重介质 Darcy-Forchhei-

mer 耦合流动模拟方法及工程应用[J]. 岩土工程学报,2021,43(11):2037-2045.
XIONG Feng,JIANG Qinghui,CHEN Shengyun,et al. Modeling of coupled Darcy-Forchheimer flow in fractured porous media and its engineering application[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2021,43(11):2037-2045(in Chinese).

[72] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering geology,1973,7(4):287-332.

[73] BARTON N,CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock mechanics,1977,10(1):1-54.

[74] 陈雷,王媛,牛玉龙. 粗糙度与隙宽对单裂隙达西-非达西流演变规律的影响研究[J]. 河南科学,2017,35(12):1988-1994.
CHEN Lei,WANG Yuan,NIU Yulong. Influence of roughness and fracture width on the transition from darcy to non-Darcy behavior for flow through rough single fracture[J]. Henan science,2017,35(12):1988-1994(in Chinese).

[75] RAVEN K G,GALE J E. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1985,22(4):251-261.

[76] RASOULI V,HOSSEINIAN A. Correlations *developed* for estimation of hydraulic parameters of rough fractures through the simulation of JRC flow channels[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2011,44(4):447-461.

[77] 熊峰,孙昊,姜清辉,等. 粗糙岩石裂隙低速非线性渗流模型及试验验证[J]. 岩土力学,2018,39(9):3294-3302.
XIONG Feng,SUN Hao,JIANG Qinghui,et al. Theoretical model and experimental verification on non-linear flow at low velocity through rough-walled rock fracture[J]. Rock and soil mechanics, 2018,39(9):3294-3302(in Chinese).

[78] 贺玉龙,陶玉敬,杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):3235-3240.
HE Yulong,TAO Yujing,YANG Lizhong. Experimental research on hydraulic behaviors in a single joint with various values of JRC[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(S1):3235-3240(in Chinese).

[79] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1629-1635.
YANG Jinbao,FENG Xiating,PAN Pengzhi. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history[J]. Rock and soil mechanics,2013,34(6):1629-1635(in Chinese).

[80] AZIZMOHAMMADI S,SEDAGHAT M. The impact of stress orientation and fracture roughness on the scale dependency of permeability in naturally fractured rocks[J]. Advances in water resources, 2020,141:103579.

[81] 赵明凯,孔德森. 考虑裂隙面粗糙度和开度分形维数的岩石裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(10):1993-2002.
ZHAO Mingkai,KONG Desen. Study on seepage characteristics of rock fractures considering fracture surface roughness and opening fractal dimension[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2022,41(10):1993-2002(in Chinese).

[82] GE S M. A governing equation for fluid flow in rough fractures[J]. Water resources research,1997,33(1):53-61.

[83] MURATA S,MITSUISHI H,SAITO T. Characterization of fracture permeability by using a fractal model[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Richardson, Texas, USA: OnePetro,2002:SPE-77881-MS.

[84] BELEM T,HOMAND-ETIENNE F,SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. Rock mechanics and rock engineering,2000,33(4):217-242.

[85] XIAO W M,XIA C C,WEI W,et al. Combined effect of tortuosity and surface roughness on estimation of flow rate through a single rough joint[J]. Journal of geophysics and engineering,2013,10(4):045015.

[86] 速宝玉,詹美礼,张祝添. 充填裂隙渗流特性实验研究[J]. 岩土力学,1994,15(4):46-52.
SU Baoyu,ZHAN Meili,ZHANG Zhutian. Experimental research of seepage characteristic for filled fracture[J]. Rock and soil mechanics,1994,15(4):46-52(in Chinese).

[87] 于龙,陶同康. 岩体裂隙水流的运动规律[J]. 水利水运科学研究,1997(3):208-218.
YU Long,TAO Tongkang. Law of flow movement for rock fractures[J]. Journal of nanjing hydraulic research institute,1997(3):208-218(in Chinese).

[88] 刘杰,李建林,胡静,等. 劈裂砂岩有、无砂粒填充条件下的多因素对渗流量影响对比分析[J]. 岩土力学,2014,35(8):2163-2170.
LIU Jie,LI Jianlin,HU Jing,et al. Comparative analysis of multiple factors affecting seepage flow of splitting sandstone with fillers or non-fillers[J]. Rock and soil mechanics,2014,35(8):2163-2170(in Chinese).

[89] 陈金刚,张景飞. 充填物的力学响应对裂隙渗流的影响[J]. 岩土力学,2006,27(4):577-580.
CHEN Jingang,ZHANG Jingfei. Influence of mechanical responses of fillings on fracture seepage[J]. Rock and soil mechanics,2006,27(4):577-580(in Chinese).

[90] 刘才华,陈从新,付少兰. 充填砂裂隙在剪切位移作用下渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1457-1461.
LIU Caihua,CHEN Congxin,FU Shaolan. Testing study on seepage characteristics of single fracture with sand under shearing displacement[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2002,21(10):1457-1461(in Chinese).

[91] BARTON N,BANDIS S,BAKHTAR K. Strength,deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1985,22(3):121-140.

[92] 陈福煊. 孔隙喉-腔结构理论在岩石电阻物理模型中的应用[J]. 测井技术,1981(5):12-22.

CHEN Fuxuan. Application of pore throat one-cavity structure theory to rock resistance physical model[J]. Well logging technology, 1981(5):12-22(in Chinese).

[93] 陈福煊,张微. 孔隙喉腔结理论在估计岩石水驱残余油饱和度方面的应用[J]. 测井技术,1987(3):15-18.
CHEN Fuxuan, ZHANG Wei. Application of pore throat cavity junction theory in estimating residual oil saturation in rock water flooding[J]. Well logging technology, 1987(3):15-18(in Chinese).

[94] WU J S, YU B M. A fractal resistance model for flow through porous media[J]. International journal of heat and mass transfer, 2007,50(19/20):3925-3932.

[95] 刘硕,王飞,于瑞,等. 致密砂岩储层微观孔喉结构及其分形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):96-107.
LIU Shuo, WANG Fei, YU Rui, et al. Micro pore throat structure and fractal characteristics of tight sandstone reservoir[J]. Journal of Jilin University(earth science edition),2024,54(1):96-107(in Chinese).

[96] 吴金随. 破碎岩体非达西渗流研究及其应用[D]. 武汉:中国地质大学,2015.

[97] COLLINS R E. Flow of fluids through porous materials[M]. New York:Reinhold Pub. Corp.,1976.

[98] COMITI J, RENAUD M. A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: application to beds packed with parallelepipedal particles[J]. Chemical engineering science,1989,44(7):1539-1545.

[99] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Tortuous flow in porous media[J]. Physical review E,1996,54(1):406-410.

[100] YUN M J, YU B M, XU P, et al. Geometrical models for tortuosity of streamlines in three-dimensional porous media[J]. The canadian journal of chemical engineering,2006,84(3):301-309.

[101] 吴金随,胡德志,郭均中,等. 多孔介质中迂曲度和渗透率的关系[J]. 华北科技学院学报,2016,13(4):56-59.
WU Jinsui, HU Dezhi, GUO Junzhong, et al. Study on the relationship between tortuosity and permeability in porous media[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2016,13(4):56-59(in Chinese).

[102] 薛东杰,赵艾博,刘奎昌,等. 多孔介质渗透迂曲度理论推导与实验验证[J]. 矿业科学学报,2021,6(5):615-622.
XUE Dongjie, ZHAO Aibo, LIU Kuichang, et al. On the theoretical calculation of tortuosity in porous media and its experimental validation[J]. Journal of mining science and technology,2021,6(5):615-622(in Chinese).

[103] 裴雪皓,刘月田,林子愉,等. 多孔介质各向异性动态渗透率模型[J]. 石油勘探与开发,2024,51(1):173-181.
PEI Xuehao, LIU Yuetian, LIN Ziyu, et al. Anisotropic dynamic permeability model for porous media[J]. Petroleum exploration and development,2024,51(1):173-181(in Chinese).

[104] WADELL H. Volume, shape, and roundness of rock particles[J]. The journal of geology,1932,40(5):443-451.

[105] ZINGG T. Beitrag zur schotteranalyse[J]. Schweizerische mineralogische und petrographische mitteilungen,1935,15:39-140.

[106] BARRETT P J. The shape of rock particles, a critical review[J]. Sedimentology,1980,27(3):291-303.

[107] 刘清秉,项伟,BUDHU M,等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学,2011,32(S1):190-197.
LIU Qingbing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. Rock and soil mechanics,2011,32(S1):190-197(in Chinese).

[108] 张家发,叶加兵,陈劲松,等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学,2016,37(2):343-349.
ZHANG Jiafa, YE Jiabing, CHEN Jinsong, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape[J]. Rock and soil mechanics,2016,37(2):343-349(in Chinese).

[109] MAROT D, BENDAHMANE F, NGUYEN H H. Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process[J]. La houille blanche,2012,98(6):47-53.

[110] 彭家奕,张家发,沈振中,等. 颗粒形状对粗粒土孔隙特征和渗透性的影响[J]. 岩土力学,2020,41(2):592-600.
PENG Jiayi, ZHANG Jiafa, SHEN Zhenzhong, et al. Effect of grain shape on pore characteristics and permeability of coarse-grained soil[J]. Rock and soil mechanics,2020,41(2):592-600(in Chinese).

[111] 康捷,任杰,南胜豪,等. 形状效应下砂土管涌试验及水力条件分析[J]. 水力发电学报,2023,42(5):97-106.
KANG Jie, REN Jie, NAN Shenghao, et al. Sand piping tests and hydraulic condition analysis with particle shape effect[J]. Journal of hydroelectric engineering,2023,42(5):97-106(in Chinese).

[112] STEWART M L, WARD A L, RECTOR D R. A study of pore geometry effects on anisotropy in hydraulic permeability using the lattice-Boltzmann method[J]. Advances in water resources,2006,29(9):1328-1340.

[113] 曹成,许增光,柴军瑞,等. 剪切破坏过程中岩体单裂隙力学及非线性渗流特性试验研究[J/OL]. 应用力学学报.(2024-02-08)[2024-03-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20240205.1750.002.html.
CAO Cheng, XU Zengguang, CHAI Junrui, et al. Experimental study on single fracture mechanics and nonlinear seepage characteristics of rock mass during shear failure[J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics.(2024-02-08)[2024-03-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20240205.1750.002.html(in Chinese).

[114] 周创兵,陈益峰,姜清辉,等. 岩体结构面 HM 耦合分析的界面层模型[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1081-1093.
ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, JIANG Qinghui, et al. An interfacial layer model for coupled hydromechanical analysis in geological discontinuities[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2008,27(6):1081-1093(in Chinese).

[115] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock

joint[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,1999,36(5):641-650.

[116] 白正雄,陈益峰,周创兵,等. 压剪荷载作用下硬质岩石裂隙的峰后剪胀特性及其演化规律[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):4131-4138.
BAI Zhengxiong, CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, et al. Post-peak dilatancy and its evolution of hard rock fractures under normal and shear loads[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(S2):4131-4138(in Chinese).

[117] CAO C, XU Z G, CHAI J R, et al. Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process [J]. Journal of hydrology,2019,579:124142.

[118] LIU R C, HUANG N, JIANG Y J, et al. A numerical study of shear-induced evolutions of geometric and hydraulic properties of self-affine rough-walled rock fractures[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2020,127:104211.

[119] 赵延林,王卫军,万文,等. 节理剪胀耦合的岩体渗透特性数值研究与经验公式[J]. 煤炭学报,2013,38(1):91-96.
ZHAO Yanlin, WANG Weijun, WAN Wen, et al. Numerical study of joint shear dilatation coupling seepage characteristic of rock mass and experiential formula[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(1):91-96(in Chinese).

[120] ZHAO Z H. Gouge particle evolution in a rock fracture undergoing shear:a microscopic DEM study[J]. Rock mechanics and rock engineering,2013,46(6):1461-1479.

[121] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):431-435.
HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2001,23(4):431-435(in Chinese).

[122] 吴梦喜,楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(3):369-371.
WU Mengxi, LOU Zhigang. Experimental study on mechanical behavior of calcareous sand-steel interfaces[J]. Rock and soil mechanics,2003,24(3):369-371(in Chinese).

[123] 王刚,游克勤,魏星,等. 压实黏土剪切带渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(8):1530-1537.
WANG Gang, YOU Keqin, WEI Xing, et al. Experimental study on permeability of shear bands in compacted clay[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41 (8): 1530- 1537 (in Chinese).

[124] 蔡海荣,朱宣杰,陈清华. 基于钻孔压水试验数据的岩体裂隙特征分析[J]. 土工基础,2014,28(3):97-99.
CAI Hairong, ZHU Xuanjie, CHEN Qinghua. Characterization of rock fissures by packer tests[J]. Soil engineering and foundation, 2014,28(3):97-99(in Chinese).

[125] 黄勇,周麟桐,周志芳. 高水压力作用下裂隙岩体渗透性的变化研究[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1433-1438.
HUANG Yong, ZHOU Lintong, ZHOU Zhifang. Equations for permeability variation of fractured rock mass under high water pressure[J]. Journal of engineering geology,2018,26(6):1433-1438 (in Chinese).

[126] 林志南,冯世宏,王家全,等. 高应力和高渗压下粗糙单裂隙非线性渗透行为试验研究[J/OL]. 土木工程学报.(2024-01-25)[2024-03-15]. https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23070624.
LIN Zhinan, FENG Shihong, WANG Jiaquan, et al. Experimental study on nonlinear permeability behavior of rough single crack under high stress and high osmotic pressure[J/OL]. China civil engineering journal.(2024-01-25)[2024-03-15]. https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23070624(in Chinese).

[127] STERPI D. Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow[J]. International journal of geomechanics,2003,3(1):111-122.

[128] MOFFAT R A, FANNIN R J. A large permeameter for study of internal stability in cohesionless soils[J]. Geotechnical testing journal,2006,29(4):273-279.

[129] WANG J J, QIU Z F. Anisotropic hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient of a crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. Marine georesources & geotechnology,2017,35(1):89-97.

[130] 杨忠平,李勇华,李诗琪,等. 不同含石率土石混合体水力侵蚀分异特征及机制[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(1):133-145.
YANG Zhongping, LI Yonghua, LI Shiqi, et al. Differentiation characteristics and mechanism of hydraulic erosion of soil-rock mixtures with different rock contents[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2024,43(1):133-145(in Chinese).

[131] LIANG Y, YEH T C J, ZHA Y Y, et al. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage[J]. Soils and foundations, 2017,57(5):849-860.

[132] 王媛,速宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽[J]. 水科学进展,2002,13(1):61-68.
WANG Yuan, SU Baoyu. Research on the behavior of fluid flow in a single fracture and its equivalent hydraulic aperture[J]. Advances in water science,2002,13(1):61-68(in Chinese).

[133] LOMIZE G M. Flow in fractured rock(in Russian)[M].[S.l.]: Moscow,1951.

[134] LOUIS C, MAINI Y N. Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock[C]//2nd ISRM Congress. Richardson, Texas, USA: OnePetro,1970: ISRM-2CONGRESS-1970-032.

[135] 王志良,申林方,李邵军,等. 基于格子 Boltzmann 方法的岩体单裂隙面渗流特性研究[J]. 岩土力学,2017,38(4):1203-1210.
WANG Zhiliang, SHEN Linfang, LI Shaojun, et al. Seepage characteristics of a single fracture based on lattice Boltzmann method [J]. Rock and soil mechanics,2017,38(4):1203-1210(in Chinese).

[136] 甘磊,马洪影,沈振中. 下凹形态裂隙面粗糙程度表征及立方定律修正系数拟合[J]. 水利学报,2021,52(4):420-431.
GAN Lei, MA Hongying, SHEN Zhenzhong. Roughness characterization of concave fracture surface and coefficient fitting of modified cubic law[J]. Journal of hydraulic engineering,2021,52(4):420-

431(in Chinese).

[137] NEUZIL C E,TRACY J V. Flow through fractures[J]. Water resources research,1981,17(1):191-199.

[138] TSANG Y W,WITHERSPOON P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. Journal of geophysical research,1981,86(B10):9287-9298.

[139] 何冠鸿. 岩石单裂隙渗流粗糙起伏角修正公式研究[D]. 北京:清华大学,2014.

[140] 卢占国,姚军,王殿生,等. 平行裂缝中立方定律修正及临界速度计算[J]. 实验室研究与探索,2010,29(4):14-16.
LU Zhanguo,YAO Jun,WANG Diansheng,et al. Correction of cubic law and calculation of critical velocity in parallel fractures[J]. Research and exploration in laboratory,2010,29(4):14-16(in Chinese).

[141] 张帅领,张春艳,江承阳,等. 矩形狭缝裂隙水流运动特征数值模拟研究[J]. 地下水,2023,45(5):11-14.
ZHANG Shuailing,ZHANG Chunyan,JIANG Chengyang,et al. Numerical simulation study of water flowsporting characteristics in rectangular slit fissures[J]. Ground water,2023,45(5):11-14(in Chinese).

[142] 潘汝江,何翔. 岩石断裂面曲折度影响下的粗糙单裂隙渗流规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2020,39(4):293-298.
PAN Rujiang,HE Xiang. Seepage law of rough single fracture under the influence of tortuosity of rock fracture surface[J]. Journal of Liaoning Technical University(natural science),2020,39(4):293-298(in Chinese).

[143] BARTON N R. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses:International Society for Rock Mechanics[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1978,15(6):319-368.

[144] BARTON N,BANDIS S,BAKHTAR K. Strength,deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1985,22(3):121-140.

[145] 徐青,喻亚奇. 岩石裂隙渗流立方定律的修正及应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2024,57(8):1013-1021.
XU Qing,YU Yaqi. Revision and application of seepage cubic law in rock fracture[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2024,57(8):1013-1021(in Chinese).

[146] 张戈,田园,李英骏. 不同 JRC 粗糙单裂隙的渗流机理数值模拟研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学),2019,49(1):30-39.
ZHANG Ge,TIAN Yuan,LI Yingjun. Numerical simulation of seepage mechanism in different JRC rough single cracks[J]. Scientia Sinica(physica,mechanica & astronomica),2019,49(1):30-39(in Chinese).

[147] JANICEK J D,KATZ D L V. Applications of unsteady state gas flow calculations[EB/OL].[2024-03-17]. https://hdl.handle.net/2027.42/5753.

[148] KUNDU P,KUMAR V,MISHRA I M. Experimental and numerical investigation of fluid flow hydrodynamics in porous media:characterization of pre-Darcy,Darcy and non-Darcy flow regimes[J]. Powder technology,2016,303:278-291.

[149] 刘波,王明玉,张敏,等. 裂隙网络管道模型弥散试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2016,46(1):230-239.
LIU Bo,WANG Mingyu,ZHANG Min,et al. Dispersivity experimental investigation based on fracture network pipe model[J]. Journal of Jilin University(earth science edition),2016,46(1):230-239(in Chinese).

[150] 王明玉,刘庆哲,曲辞晓,等. 基于圆盘裂隙物理模型的岩体单一裂隙渗流规律试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(11):3523-3530.
WANG Mingyu,LIU Qingzhe,QU Cixiao,et al. Experimental investigation on the seepage flow through a single fracture in rocks based on the disc fracture model[J]. Rock and soil mechanics,2020,41(11):3523-3530(in Chinese).

[151] NI X D,NIU Y L,WANG Y,et al. Non-Darcy flow experiments of water seepage through rough-walled rock fractures[J]. Geofluids,2018,2018:8541421.

[152] CHEN Y F,ZHOU J Q,HU S H,et al. Evaluation of forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures[J]. Journal of hydrology,2015,529,Part 3:993-1006.

[153] 邹信方,黄正鹏. 用压力梯度的门限值来修正达西定律[J]. 国外油田工程,2000,16(7):21-22.
ZOU Xinfang,HUANG Zhengpeng. The threshold value of pressure gradient is used to modify Darcy's law[J]. Foreign oilfield engineering,2000,16(7):21-22(in Chinese).

(编辑 张璐)